

Les besoins en observations pour la climatologie

Pierre Bessemoulin

Météo-France - Direction de la climatologie
42, avenue Gaspard-Coriolis - 31057 Toulouse Cedex
pierre.bessemoulin@meteo.fr

et **Olivier Boucher**

Laboratoire d'optique atmosphérique
CNRS et université de Lille - Villeneuve-d'Ascq
boucher@loa.univ-lille1.fr

Résumé

On examine les besoins en observations pour la climatologie, en particulier dans un contexte de changement climatique planétaire. Pour l'ensemble des données climatologiques, qu'il s'agisse d'observations in situ en surface ou en altitude, d'observations par télédétection ou de données issues de modèles météorologiques, le principal problème posé par l'exploitation de longues séries de données en vue d'isoler le signal climatique est leur hétérogénéité. Quelques sources d'hétérogénéité sont identifiées et certaines façons d'y remédier sont décrites.

Abstract

Observational needs for climatology

The observational requirements of climatology are examined, particularly within the context of global climate change. For all types of climatological data (in situ surface, upper-air, remotely sensed observations, data derived from meteorological models) their lack of homogeneity is the main problem raised when processing long series to identify the climate signal. Some sources of non homogeneity are reviewed, as well as the means to cope with them.

Nature et buts de la climatologie

La climatologie vise à caractériser les climats passés et présents : conditions moyennes et extrêmes, lois de probabilité des paramètres les déterminant et éventuelles tendances à long terme. Ces informations ont de multiples applications socio-économiques : aménagement du territoire, dimensionnement d'ouvrages d'art, agriculture et foresterie, gestion des ressources en eau, tourisme ou santé... Les données météorologiques délivrées sous forme quantifiable (numérique de préférence) par un capteur constituent l'information de base pour atteindre un tel objectif. De telles données commencent à exister dès la fin du XVII^e siècle, mais c'est surtout à compter du milieu du XIX^e siècle que l'on dispose, essentiellement en Europe, de données permettant de tracer des champs de surface (principalement température, précipitations et pression).

Outre l'exploitation de ces données instrumentales, des informations à caractère climatologique peuvent être reconstituées qualitativement à partir de données historiques : données phénologiques, dates des semis, dates et volumes des récoltes, dates des disettes, dates du gel des grands fleuves, des lacs et de la mer, extension des glaciers (Le Roy Ladurie, 1983). La faible durée de la période pour laquelle on dispose de mesures météorologiques (trois cents ans au maximum) a bien sûr incité les climatologues à utiliser des moyens indirects pour remonter aux paramètres physiques des climats passés, à partir d'éléments naturels qui constituent en quelque sorte une « mémoire » du climat (Berger, 1992). Il s'agit de données, qualifiées de **proxy**, telles que :

- la composition isotopique de l'oxygène, du carbone et du deutérium présents dans les sédiments lacustres, les sédiments océaniques, les glaciers, les calottes polaires, les cernes des arbres, les strates géologiques, les stalactites... ;
- des indicateurs de la faune et de la flore du passé (plantes et pollens fossiles, animaux marins ou aquatiques...);
- des indicateurs géologiques.

L'exploitation de tels paramètres requiert évidemment un étalonnage, d'où l'intérêt des données d'observations récentes pour cette discipline que constitue la paléoclimatologie.

Les données climatologiques constituent également un élément essentiel pour initialiser et valider les prévisions climatiques, qui sont l'outil principal pour se projeter dans l'avenir dans un contexte d'augmentation de la teneur des gaz à effet de serre. C'est dans cette problématique que nous nous plaçons essentiellement ici. Les questions abordées sont illustrées par des exemples nationaux, mais il est clair que des problèmes identiques se posent dans les autres pays.

Pendant longtemps, en particulier au XIX^e siècle, on a cru à une certaine permanence du climat moyen. Cette croyance se retrouve dans l'emploi de la notion de **normale trentenaire**, qui est simplement la moyenne sur une période de trente ans (voir encadré page 37). L'examen approfondi des longues séries de données climatologiques, réalisé surtout depuis une quinzaine d'années dans le cadre du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec), a montré qu'il n'en était rien, au moins pour certains paramètres comme la température (figure 1) et les précipitations.

Les normales trentenaires

Le terme de **normale** a été employé en climatologie pour la première fois en 1840 avec trois significations :

- en tant que référence obtenue en moyennant selon un cercle de latitude donnée ;
- en tant que référence locale obtenue à partir de longues séries de données d'observation, en vue de comparaisons spatiales et temporelles ;
- en tant que moyenne d'une longue série d'observations.

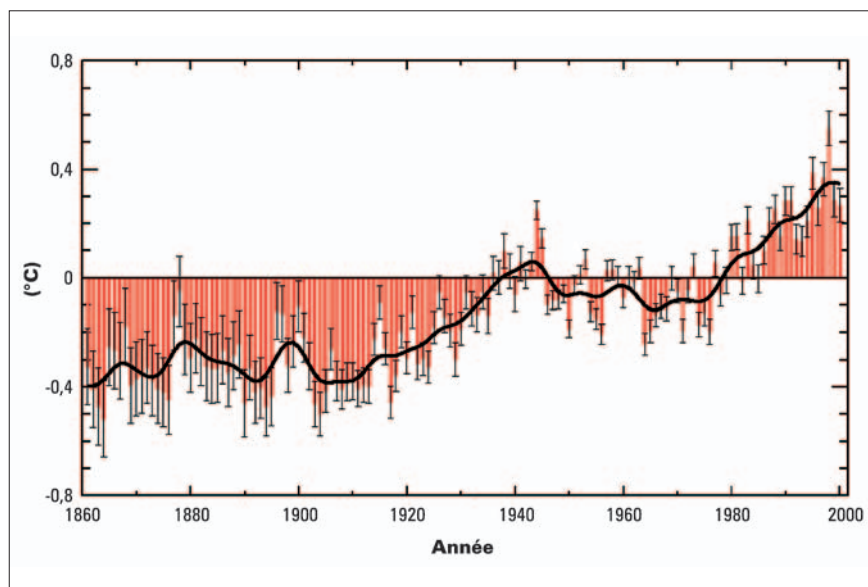
C'est cette dernière définition qui a survécu dans la suite du XIX^e siècle et au-delà. La doctrine en vigueur à l'époque était que le climat moyenné sur des périodes suffisamment longues est constant et que des moyennes portant sur de telles durées doivent converger vers une valeur stable dite « normale ». Des accords internationaux ont considéré qu'une période de trente ans était nécessaire pour calculer les normales. En 1930, l'Organisation météorologique internationale (l'ancêtre de l'OMM) a décidé que la période 1901-1930 constituerait la première période, les suivantes étant 1931-1960, 1961-1990, etc. Du fait du changement climatique mis en évidence lors des dernières décennies, la notion de climat stable s'est révélée obsolète. L'OMM a donc formulé en 1984 de nouvelles définitions, réaffirmées en 2001 lors de la dernière session de sa Commission de climatologie :

- les **normales climatologiques standard** restent les moyennes calculées sur les périodes consécutives de trente ans indiquées plus haut et font l'objet d'un effort international coordonné par l'OMM et auquel l'ensemble des pays participe, en appliquant des règles de calcul standard ;
- les normales sont désormais des « moyennes temporelles portant sur des périodes uniformes et relativement longues comprenant au moins trois périodes consécutives de dix ans » ; la plupart des services météorologiques calculent de nouvelles normales tous les dix ans (celles pour 1971-2000 sont disponibles depuis peu en France, voir figure 2).

Pour les climatologues, le terme de normale implique simplement une opération de moyenne d'un élément climatique et l'**écart à la normale** quantifie la différence entre conditions observées à un moment donné et état moyen. Il est important de noter qu'une normale n'est en général pas la valeur la plus fréquente (mode), ni même la valeur séparant les deux moitiés de l'échantillon (médiane), contrairement à la perception du mot « normale » par le grand public qui interprète ce terme comme « ordinaire » ou « fréquent », par opposition à « anormal ».

Les normales sont notablement insuffisantes pour caractériser le climat : les utilisateurs ont en général besoin d'informations additionnelles telles que la description statistique complète du paramètre considéré : moyenne, mais aussi moments d'ordre plus élevé (écart type, aplatissement, dissymétrie), répartition statistique (percentiles, déciles ou quintiles), analyse fréquentielle, records, variabilité, tendances, fréquence des extrêmes (dont l'inverse est qualifié improprement de durée de retour), statistiques sur les durées de conditions dépassant un seuil donné, etc.

Figure 1 - Variations de la température moyenne du globe en surface au cours des 140 dernières années (en écarts à la moyenne 1961-1990). Les barres rouges indiquent les valeurs annuelles, avec des barres d'incertitude à 95 % de confiance en trait noir fin. La courbe noire épaisse est un lissage glissant des températures annuelles sur dix ans. © IPCC/Giec



Instrumentation et données climatologiques

Quels sont les problèmes auxquels sont confrontés les climatologues modernes pour fournir des données pouvant être utilisées comme des références pour étudier l'évolution des climats anciens et pour valider les modèles climatiques destinés à prévoir les climats futurs ? Sans doute, en premier lieu, la longueur des séries chronologiques. Celle-ci limite à la fois l'estimation des tendances à long terme et celle des paramètres extrêmes : il est d'usage de ne pas calculer la fréquence d'un événement extrême dont la durée de retour excéderait 4 fois la longueur de l'échantillon (voir encadré page 38). Mais, même sur une période de 150 ans, les capteurs utilisés ont changé plusieurs fois, chacun a pu dériver et les abris météorologiques ont eux aussi subi des modifications considérables. L'environnement de la station a pu être modifié (en particulier à cause de l'urbanisation), les pratiques d'observation ont pu évoluer (par exemple, les heures d'observation, la durée de cumul pour les précipitations ou le passage d'une observation humaine à une observation automatique). Toutes les informations correspondantes, appelées **métadonnées**, constituent une connaissance indispensable pour exploiter les données anciennes, mais elles sont rarement disponibles avant les années 1950. Toute longue série climatologique peut donc présenter un certain nombre de ruptures d'homogénéité (voir encadré page 38) et de dérives de nature instrumentale pouvant être interprétées à tort comme une tendance climatique. En France, deux exemples de ruptures récentes sont bien connus :

- le remplacement de l'anémomètre Papillon par l'anémomètre fréquence-métrique ;
- le remplacement de l'héliographe Campbell par l'héliographe à fibre optique Cimel (Tamburini, 1996).

En la matière, les besoins des climatologues sont de deux ordres. Tout d'abord, pour interpréter les données anciennes, en particulier pour détecter de façon fiable les tendances caractérisant le changement climatique, ils ont besoin de techniques permettant d'identifier les ruptures d'homogénéité et de les corriger. Il existe désormais une panoplie de tels outils (Peterson et al., 1998) qui ont été appliqués, par exemple, pour caractériser le réchauffement

climatique en France au XX^e siècle (Moisselin et al., 2002). La disponibilité de métadonnées est souvent cruciale dans cette phase.

En second lieu, il s'agit de collecter des données aussi homogènes que possible sur le siècle à venir afin de ne pas renouveler les erreurs du passé. Cela passe par l'instrumentation de sites dont la représentativité régionale est connue et dont la qualité d'un point de vue

La durée de retour

Dans nombre de domaines d'activité tributaires des conditions atmosphériques, ce n'est pas le climat moyen qui présente de l'intérêt, mais plutôt les événements extrêmes. C'est le cas pour le dimensionnement des ouvrages d'art, qui doivent pouvoir résister jusqu'à certains seuils de paramètres météorologiques. Le problème qui se pose alors peut se formuler comme suit : « Disposant d'un échantillon d'un paramètre donné et connaissant la valeur extrême de ce paramètre jusqu'à laquelle on souhaite que l'ouvrage résiste, quelle est la fréquence moyenne de dépassement de ce seuil ? » L'inverse de cette fréquence moyenne (par exemple, une fois tous les cent ans) est qualifiée de **durée de retour** et s'exprime en années (pour l'exemple ci-dessus, elle est de cent ans).

météorologique est chiffrée et pourra être pérennisée (les parcs nationaux ou régionaux constituent à cet égard des zones privilégiées). Cela passe aussi par l'utilisation de capteurs de qualité effectuant si possible des mesures redondantes, par la mise en œuvre de mesures en double à l'occasion des changements de capteurs ou de sites et, bien entendu, par la sauvegarde des sites pour lesquels on dispose de très longues séries. En outre, une maintenance préventive et corrective efficace va de pair avec cette démarche afin de minimiser les pannes. Cette philosophie est à la base du *US Climate Reference Network*, réseau en cours de déploiement aux États-Unis et dont la vocation affichée est en premier lieu climatologique, à savoir fournir prioritairement de longues séries temporelles ne présentant pas de biais (voir le site Internet [lwf.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/crn/crnmain.html]). Les spécifications météorologiques estimées nécessaires pour conduire un tel programme n'ont rien d'inaccessible et correspondent peu ou prou à celles en vigueur dans les réseaux automatisés européens (tableau 1).

Isoler le signal climatique

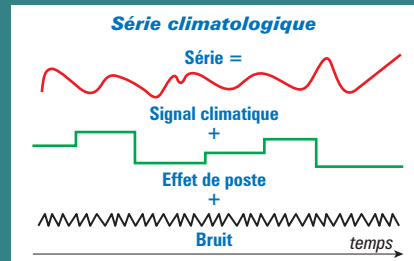
Une longue série temporelle de données climatologiques est généralement constituée de la superposition de plusieurs signaux :

– du signal climatique, que l'on cherche à isoler ;

– de ruptures d'homogénéité se traduisant par des décrochages brusques du signal moyen et provenant très souvent des effets liés au poste de mesure (modification des conditions de la mesure, des pratiques d'observation, de l'environnement du site, etc.) ;

– de tendances, qui peuvent résulter de dérives instrumentales ou du signal climatique proprement dit ;

– du bruit.



Il faut noter que, dans la majorité des pays, il n'existe pas de réseau à vocation prioritairement climatologique et que l'on fait généralement de la climatologie avec des données dont la vocation initiale est tout autre (signalisation du temps présent et des phénomènes extrêmes, initialisation des modèles de prévision du temps, surveillance des conditions routières, etc.). Il y a une exception notable en France (et dans quelques autres pays) avec le Réseau climatologique d'État, mais celui-ci ne mesure que des quantités journalières et limitées au cumul des pluies et aux températures minimale et maximale, paramètres pouvant être étendus à certains éléments du temps sensible au gré de la motivation des observateurs (Galliot, 2003).

Enfin, l'opportunité de mettre en place un réseau destiné à documenter le changement climatique (c'est l'objectif affiché du *Climate Reference Network* américain) est particulièrement d'actualité, avec la mise en place récente en France de l'Observatoire sur les effets du réchauffement climatique.

Les effets de l'automatisation des mesures

Les réseaux au sol

Depuis quelques années, différentes contraintes, en particulier budgétaires, ont favorisé la disparition progressive des observateurs au bénéfice de mesures automatiques, ainsi que la fermeture de stations la nuit ou le week-end. Si cela ne pose pas de problème particulier dès lors qu'une procédure permet de valider la donnée mesurée de façon automatique avant sa diffusion aux utilisateurs – c'est le cas pour des paramètres physiques comme la pression, la température, l'humidité, le vent ou le rayonnement et c'est même extrêmement bénéfique en termes de pas de temps –, il en va tout autrement pour l'observation du temps sensible, comme l'occurrence des phénomènes tels que la grêle, la pluie et l'orage ou la distinction entre pluie et rosée. C'est ainsi qu'il est

Tableau 1 - Spécifications météorologiques du *US Climate Reference Network*.

	Température	Précipitations	Vitesse du vent	Rayonnement solaire
Cadence d'échantillonnage	2 s	1 min	2 s	2 s
Message	Horaire	Horaire	Horaire	Horaire
Gamme	De -60 °C à +60 °C	Capacité : 600 mm Intensité maximale : 30 mm/min	Jusqu'à 60 m/s hors zones à cyclones	De 0 à 1 500 W/m ²
Résolution	0,1 °C	0,1 mm	0,1 m/s	1 W/m ²
Précision	± 0,3 °C	± 0,2 mm ou 2 % de la mesure	± 0,2 m/s ou 2 % de la mesure	± 5 % du cumul quotidien

devenu parfois impossible de produire les statistiques de paramètres extrêmement populaires (par exemple, pour le tourisme) tels que la durée des précipitations, la couverture nuageuse et la fréquence des orages ou de la grêle à la station. À terme, l'avènement de capteurs de temps présent (Leroy et Zanghi, 2002) résoudra sans doute en partie les difficultés actuelles, mais, pour un grand nombre de paramètres et de stations, on peut considérer que l'automatisation a eu pour conséquence de mettre fin à de longues séries climatologiques, qu'il faut redémarrer de façon différente avec les capteurs de temps présent. On peut citer à titre d'exemple la mesure de la visibilité : l'observateur utilisait différents repères à des distances connues, alors que les diffuseurs mesurent la « portée optique météorologique » dans un volume d'atmosphère réduit.

Une réflexion a été engagée récemment à Météo-France à propos de l'automatisation de l'observation. Il est probable qu'elle conclura en particulier que l'on ne pourra se contenter de déployer des capteurs, mais qu'il faudra également s'appuyer sur des données d'origine et de nature diverses, analysées par des systèmes experts. Il apparaît essentiel qu'une telle réflexion puisse être prolongée dans le cadre de l'OMM, afin d'harmoniser autant que possible les pratiques nationales.

Les régions de montagne

Dans une perspective de documentation du changement climatique, il est essentiel de disposer de mesures dans les régions qui y sont à priori le plus sensibles. Parmi celles-ci, les zones de moyenne montagne, particulièrement menacées, notamment pour ce qui est du manteau neigeux, sont sous-instrumentées. Dans l'hypothèse d'un réchauffement de 2 °C, le nombre de jours avec neige au sol diminuerait d'un mois (Martin et al., 1997). Par ailleurs, on ne peut que regretter l'interruption de séries de mesures historiques en haute montagne : en France métropolitaine, seul demeure l'observatoire du mont Aigoual, situé à moins de 1 600 mètres d'altitude, sur l'ensemble des 7 % du territoire dépassant 1 000 mètres d'altitude. Si l'on conçoit que la

pérennisation de l'observatoire installé au début du xx^e siècle près du sommet du mont Blanc se soit révélée difficile (il a cependant fonctionné pendant près de vingt ans), le Ventoux, le puy de Dôme et, surtout, le pic du Midi constituaient des sites privilégiés pour l'observation du changement climatique, loin des influences urbaines, au même titre que pour la surveillance de la pollution de fond. Compte tenu de la vocation nouvelle du pic du Midi, la faisabilité de redémarrer des observations en partenariat mériterait donc d'être étudiée.

Le cas des précipitations

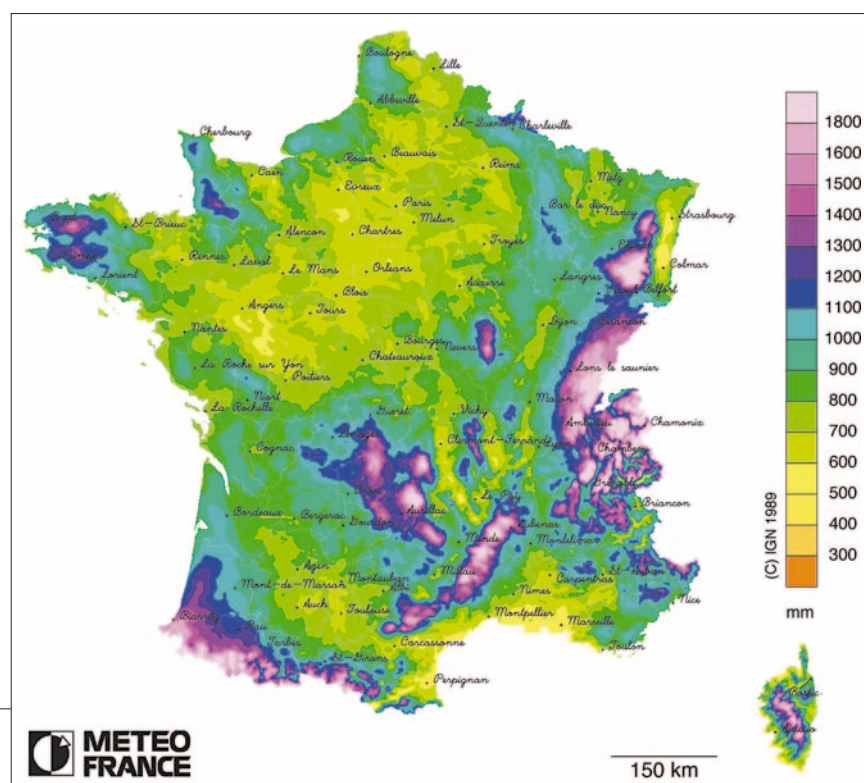
Les études relatives à l'évolution du climat ont souvent privilégié les données de température et de précipitations, car ce sont généralement celles qui ont la plus grande profondeur historique (figure 2). Si l'on sait assez bien mesurer la température à condition de disposer d'abris correctement ventilés, la situation est loin d'être la même pour la mesure des précipitations. Les pluviomètres sont connus pour sous-estimer les précipitations en raison du mouillage des parois et des pertes lors du basculement de l'auget en cas de forte intensité pluvieuse ; les pertes sont typiquement de 6 % à 100 mm/h et de 12 % à 200 mm/h pour le nouveau pluviomètre Degréane, moitié moins pour le pluviomètre Précis-Mécanique de 1 000 mm².

Mais ce sont surtout les effets de la vitesse du vent sur le pouvoir de captation des pluviomètres qui sont pénalisants : ce pouvoir varie de façon considérable avec la vitesse du vent en raison des effets aérodynamiques et de la turbulence générés par l'orifice de l'instrument (Leroy, 2002). Pour la neige, les pertes peuvent dépasser 85 % pour des vents moyens de 7 m/s (Goodison et al., 1998). Les solutions correctrices sont connues (Dover et Winans, 2002) et passent par l'utilisation de brise-vent, rarement mis en œuvre en dehors des pays nordiques. Il serait très souhaitable que le nouveau réseau Radome de Météo-France (Tardieu, 2003) adopte à terme de tels dispositifs, ainsi que des systèmes de réchauffage des pluviomètres sur l'ensemble des stations, pour ne pas « rater » les quelques épisodes neigeux se produisant en plaine chaque année. C'est d'ailleurs l'occasion de rappeler que depuis l'installation d'une station automatique, il y a trois fois moins de précipitations mesurées au pic du Midi !

Autres données

Des données autres que celles issues des réseaux au sol sont de plus en plus utilisées en climatologie : on citera en premier lieu les données d'altitude obtenues à l'aide de radiosondages. Là encore, ce sont des problèmes d'hétérogénéité dans les temps qui se posent, que ce soit dans

Figure 2 - Carte des valeurs normales 1971-2000 du cumul annuel des précipitations sur la France.



Les réanalyses

Réanalyser l'ensemble des observations effectuées dans l'atmosphère, partout sur la planète et sur de nombreuses années consécutives, c'est « analyser » à posteriori toutes ces observations du passé à l'aide d'un modèle numérique unique. On obtient ainsi tous les paramètres atmosphériques aux nœuds d'une grille régulière à trois dimensions, avec un suivi continu dans le temps, ce qui permet de combler les lacunes et les imperfections du Système mondial d'observation.

Les réanalyses offrent tous les avantages de l'analyse des observations par un modèle numérique d'atmosphère : obtention d'informations sur l'état de l'atmosphère dans les régions dépourvues d'observations, calcul de paramètres inaccessibles à la mesure comme les champs de vitesse verticale, cohérence dans l'espace et dans le temps garantie par la prise en compte des lois de la mécanique des fluides. De plus, grâce à l'emploi d'un modèle unique, elles éliminent le problème que poserait l'utilisation en climatologie des analyses opérationnelles effectuées pour la prévision du temps, qui sont obtenues avec des modèles très fréquemment modifiés.

Les deux principales actions en cours sur les réanalyses sont européenne et américaine. Au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), une première action nommée ERA-15 a fourni des réanalyses sur la période 1979-1993. Un deuxième projet plus ambitieux, nommé ERA-40, vise à fournir avec un pas de six heures des réanalyses sur la période allant de la mi-1957 à 2001 (voir [www.ecmwf.int/research/era/]). Le projet américain est conjoint entre les National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP) et le National Center for Atmospheric Research (NCAR). Les réanalyses sont obtenues avec un pas de six heures, sur la période 1948-2000 (voir [wesley.www.noaa.gov/reanalysis.html]).

le cas du vent mesuré à l'aide de différents systèmes de localisation (radar, puis systèmes Omega, Loran C et GPS) ou dans celui de la température de la basse stratosphère, pour laquelle les corrections de rayonnement successives appliquées dans certains logiciels commerciaux entraînent des variations de plusieurs degrés. Des problèmes plus sournois ont été identifiés récemment, comme le biais sec de certains capteurs d'humidité Vaisala, qui a une faible influence sur les valeurs d'humidité relative, mais un fort impact sur certains paramètres qui en sont dérivés.

Autres sources de données pour la climatologie, les mesures radar et foudre – mais elles n'existent sous forme quantitative que depuis quelques années – et les sorties des modèles numériques. Les sorties des modèles Arpège et Aladin ont ainsi été utilisées dans différents domaines, en particulier pour calculer des roses de vent en points de grille. Il faut savoir que ces données présentent également des ruptures d'homogénéité, résultant en particulier des changements importants survenus dans les paramétrisations de ces modèles. L'avantage des **réanalyses** (voir encadré ci-contre) est qu'elles couvrent des périodes de quarante ans à l'aide de la même version du modèle. Malgré cela, de nombreux exemples montrent qu'il vaut mieux valider avec des observations les climatologies dérivées des réanalyses avant de les utiliser (Poccard et al., 2000).

La climatologie satellitaire

De la mesure par satellite à la climatologie

Au fil des années, les mesures satellitaires sont devenues un complément indispensable des mesures en réseau depuis la surface. Un radiomètre embarqué sur un satellite géostationnaire ou défilant échantillonne en temps, en espace, en direction et en longueur d'onde le champ de rayonnement au sommet de l'atmosphère. Si le rayonnement en lui-même est utile pour étudier le bilan radiatif de la planète, et donc le climat, il est également intéressant d'utiliser ces mesures radiatives pour en déduire certaines des variables de l'atmosphère. Il convient de distinguer le **problème direct**, qui consiste à calculer le champ de rayonnement à partir des paramètres atmosphériques, du **problème inverse** par lequel les luminances spectrales mesurées par le satellite sont traduites en variables géophysiques. Les problèmes inverses en télédétection reposent sur le fait qu'il existe des longueurs d'onde (ou des combinaisons de longueurs d'onde) pour lesquelles le rayonnement

est sensible à l'un ou l'autre des paramètres géophysiques. La mesure du rayonnement dans le domaine allant du visible à l'infrarouge est très utile pour caractériser la couverture nuageuse (ainsi que les aérosols en ciel très clair). Le canal d'absorption de la vapeur d'eau permet de renseigner sur la quantité de vapeur d'eau dans la haute troposphère. La répartition spectrale du rayonnement dans les longueurs d'onde de 3,5 à 20 μm est sensible aux profils verticaux de température et d'humidité (Cayla, 2001).

Il existe plusieurs jeux de données satellitaires qui permettent de documenter le climat de la Terre. On peut citer les radiomètres AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) et les sondeurs Toms (Tiros Operational Vertical Sounder) de la série de satellites défilants américains NOAA, les satellites géostationnaires européens *Météosat* (tableau 2) ou encore les satellites américains de la série *DMSP* (Defense Meteorological Satellite Program). Dans ces trois cas, il existe des séries temporelles suffisamment longues pour dresser des climatologies de paramètres atmosphériques.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
1977							
1978							
1979							
1980							
1981							
1982							
1983							
1984							
1985							
1986							
1987							
1988							
1989							
1990							
1991							
1992							
1993							
1994							
1995							
1996							
1997							
1998							
1999							
2000							
2001							
2002							

Tableau 2 - Durée de vie des satellites géostationnaires de la série *Météosat*. Pour *Météosat 5 (M5)*, le changement de couleur correspond au déplacement du satellite au-dessus de l'océan Indien en 1998.

L'exemple le plus abouti de climatologie satellitaire concerne la couverture nuageuse avec le projet ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project, voir le site Internet [isccp.giss.nasa.gov]). Rossow et Schiffer (1991) ont assemblé les données des satellites géostationnaires (*Goes est et Goes ouest, Météosat et GMS*) et des satellites défilants NOAA avec un travail minutieux sur l'étalonnage mutuel des capteurs (Brest et Rossow, 1992). Plusieurs jeux de données ont été créés, allant des synthèses journalières à la résolution de 50 kilomètres à des synthèses mensuelles à la résolution de 280 kilomètres. Cette climatologie s'est révélée un outil très précieux pour étudier la variabilité interannuelle de la couverture nuageuse et évaluer le degré de réalisme des modèles de circulation générale. Klein et Hartmann (1993) ont néanmoins montré que des discontinuités dans l'étalonnage des radiomètres se traduisaient par une légère diminution au fil des ans de l'épaisseur optique et de la température de sommet des nuages dans la climatologie ISCCP.

Une nouvelle climatologie, qui couvre la période de juillet 1983 à décembre 1999 et dont un exemple est donné sur la figure 3, est en cours d'élaboration ; elle prend en compte un meilleur étalonnage des capteurs (Doutriaux-Boucher et Sèze, 1998). De la même manière, Eumetsat procède à un retraitement de l'ensemble des données des satellites *Météosat* de 1983 à nos jours, afin de fournir une climatologie de ses produits opérationnels (vents déduits du mouvement des nuages, luminances en ciel clair, produits issus de l'analyse des nuages). Forts de l'expérience d'ISCCP et après avoir étudié les variations de la couverture nuageuse à différentes échelles de temps et d'espace, Rossow et Cairns (1995) ont posé les critères suivants pour la définition d'un futur système satellitaire de surveillance des nuages :

- une couverture planétaire de densité uniforme ;
- un échantillonnage spatial inférieur ou égal à 50 kilomètres ;
- un échantillonnage temporel inférieur ou égal à 4 heures ;
- une durée de surveillance supérieure ou égale à 10 ans.

Controverse sur fond de réchauffement climatique

Récemment, une analyse des mesures satellitaires micro-ondes MSU (Microwave Sounding Unit, l'un des trois instruments du système Tovas) de Spencer et Christy (1990) a montré une absence de réchauffement, voire un refroidissement de la basse troposphère lors des vingt dernières années. Cette étude, en apparent désaccord avec l'analyse des mesures de température à la surface, n'a pas manqué d'apporter de l'eau au moulin des quelques scientifiques et groupes de pression qui combattent l'idée d'un réchauffement planétaire. Wentz et Schabel (1998) ont montré que la résolution du problème inverse était biaisée par le fait que Spencer et Christy avaient négligé de corriger certains changements des paramètres orbitaux des satellites. L'introduction de cette correction a réduit la différence entre mesures satellitaires et mesures de surface, mais ne l'a pas éliminée complètement (Christy et al., 2000). Santer et al. (2000) ont finalement montré que l'erreur résiduelle pouvait en partie s'expliquer par la couverture spatiale différente des deux types de mesures et par la nature des perturbations radiatives subies par le système climatique. La polémique n'est pas terminée (voir [www.ghcc.msfc.nasa.gov/MSU/msusci.html]), mais ce cas d'étude pointe à la fois les problèmes d'échantillonnage des satellites, ceux de représentativité des réseaux de mesures au sol, mais aussi la difficulté de construire une série temporelle cohérente à partir d'une succession d'instruments satellitaires. Une telle construction se heurte au fait que les caractéristiques des instruments satellitaires évoluent dans le temps, à la fois de manière continue en raison du vieillissement des capteurs et de manière discontinue lors des changements de satellites. C'est ainsi que les

instruments MSU sont désormais remplacés par les instruments AMSU-A et AMSU-B, aux canaux plus nombreux mais différents de ceux des MSU, ce qui oblige à simuler les anciens canaux à partir des nouveaux pour assurer l'homogénéité des séries temporelles.

Conclusion

Dans un contexte de changement climatique planétaire, les activités de nature climatologique se doivent d'être menées à la même échelle. Si la gestion des réseaux de mesure est de la responsabilité des États, leur définition passe nécessairement aussi par une concertation européenne (Dahlström, 2003) et mondiale. C'est l'esprit du programme Smoc (Système mondial d'observation du climat, GCOS en anglais, voir [www.wmo.ch/web/gcos/gcoshome.html]), qui comporte quatre volets : observation météorologique et atmosphérique, océanique, terrestre et spatiale. L'établissement de climatologies planétaires ne peut également se faire que dans le cadre d'une coopération internationale. C'est déjà le cas, avec la mise en place depuis plusieurs années de centres mondiaux spécialisés dans l'archivage de données (le World Data Center System, voir [www.wdc.rl.ac.uk/wdcmain]). Force est cependant de constater que ces centres ont parfois des difficultés à récupérer l'information ad hoc (par exemple au pas de temps inférieur à la journée), en raison de conflits avec la politique commerciale de certains services météorologiques. La difficulté pourrait être surmontée prochainement, au moins partiellement, avec l'adoption par l'OMM de la notion de « données climatologiques essentielles » (par opposition aux données dites « supplémentaires ») circulant librement sur le Système mondial de télécommunications météorologiques, comme c'est déjà le cas pour les données en temps réel.

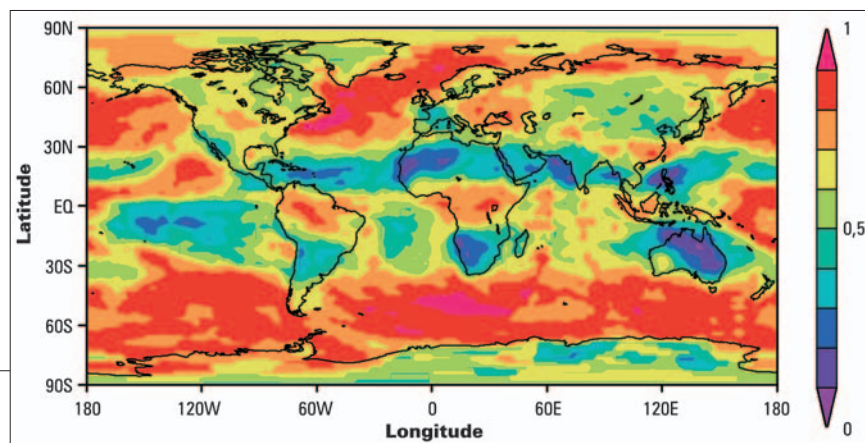


Figure 3 - Moyenne mensuelle en avril 1997 de la couverture nuageuse (exprimée entre 0 et 1) selon la climatologie ISCCP.

Les données satellitaires sont également un outil de valeur pour la surveillance du climat. Leur force réside dans leur couverture spatiale, qui est régionale dans le cas de l'orbite géostationnaire et planétaire dans le cas d'un satellite défilant. L'orbite héliosynchrone ne permet toutefois pas d'échantillonner le cycle diurne. Un échantillonnage toutes les quatre heures nécessite donc la présence simultanée de trois satellites héliosynchrones (ou de combinaisons de satellites à orbite héliosynchrone et en précession). Dans le cadre d'une surveillance des changements climatiques, il serait judicieux de développer une stratégie d'observation à long terme à partir de l'outil satellitaire. Hansen et al. (1995) ont quantifié les variations de différents paramètres

atmosphériques susceptibles de causer un changement de $0,25 \text{ W.m}^{-2}$ du bilan radiatif de la planète (à comparer au forçage radiatif des gaz à effet de serre de $2,4 \text{ W.m}^{-2}$ depuis le début de l'ère industrielle) :

- variation de 0,01 de l'épaisseur optique des aérosols troposphériques ou stratosphériques ;
- variation de 0,01 % de la constante solaire ;
- variation de 0,003 à 0,004 de la couverture nuageuse (exprimée entre 0 et 1) ;
- variation de 0,4 K de la température du sommet des nuages ;
- variation de 0,02 à 0,07 de l'épaisseur optique des nuages ;
- variation de 1 mm de la taille des gouttelettes des nuages bas.

Les mesures satellitaires consacrées à l'étude du climat doivent donc avoir des précisions au moins égales à celles-ci sur une période de dix à vingt ans. Cela implique un très bon étalonnage des instruments avec des périodes de recouvrement temporel pour chaque paire de satellites consécutifs.

Par ailleurs, force est de constater que la taille considérable des jeux de données collectés par les satellites opérationnels fait qu'il n'est pas facile de les analyser sans de grosses ressources humaines et informatiques, ce qui impliquera à terme une réorganisation des moyens des climatologues.

Bibliographie

- Berger A., 1992 : *Le climat de la Terre*. Éditions De Boeck Université, Bruxelles, Belgique.
- Brest C. L. et W. B. Rossow, 1992 : Radiometric calibration and monitoring of NOAA AVHRR data for ISCCP. *Int. J. Remote Sens.*, 13, 235-273.
- Cayla F.-R., 2001 : L'interféromètre lasi, un nouveau sondeur satellitaire à haute résolution. *La Météorologie* 8^e série, 32, 23-39.
- Christy J. R., R. W. Spencer et W. D. Braswell, 2000 : MSU tropospheric temperatures: dataset construction and radiosonde comparisons. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 17, 1153-1170.
- Dahlström B., 2003 : La conception d'un réseau climatologique ; le point de vue européen. À paraître dans *La Météorologie* 8^e série, numéro 40.
- Doutriaux-Boucher M. et G. Sèze, 1998 : Significant changes between the ISCCP C and D climatologies. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 4193-4196.
- Dover J. et L. J. Winans, 2002 : Evaluation of windshields for use in the Automated Surface Observing System (ASOS). Proceedings of the 6th Symposium on integrated observing systems, American Meteorological Society, Orlando, États-Unis.
- Galliot M., 2003 : Le réseau des observateurs bénévoles. À paraître dans *La Météorologie* 8^e série, numéro 40.
- Goodison B. E., P. Y. T. Louie et D. Lang, 1998 : WMO solid precipitation measurement intercomparison. WMO Instruments and Observing Methods Report n° 67, WMO TD n° 872, Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse.
- Hansen J., W. Rossow, B. Carlson, A. Lacis, L. Travis, A. Del Genio, I. Fung, B. Cairns, M. Mishchenko et M. Sato, 1995 : Low-cost long-term monitoring of global climate forcings and feedbacks. *Climatic Change*, 31, 247-271.
- Klein S. A. et D. L. Hartmann, 1993 : Spurious trends in the ISCCP C2 dataset. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 455-458.
- Leroy M., 2002 : La mesure au sol de la température de l'air et des précipitations. *La Météorologie* 8^e série, numéro 39.
- Leroy M. et F. Zanghi, 2002 : L'offre actuelle en capteurs de temps présent. *La Météorologie* 8^e série, numéro 39.
- Le Roy Ladurie E., 1983 : *Histoire du climat depuis l'an mil*. 2 volumes, Flammarion, Paris.
- Martin E., B. Timbal et E. Brun, 1997 : Downscaling of general circulation models outputs: simulation of the snow climatology of the French Alps. Sensitivity to climate changes. *Clim. Dyn.*, 13, 45-56.
- Moisselin J.-M., M. Schneider, C. Canellas et O. Mestre, 2002 : Les changements climatiques en France au xx^e siècle. *La Météorologie* 8^e série, 38, 45-56.
- Peterson T. C., D. R. Easterling, T. R. Karl, P. Groisman, N. Nicholls, N. Plummer, S. Torok, I. Auer, R. Boehm, D. Gullett, L. Vincent, R. Heino, H. Tuomenvirta, O. Mestre, T. Szentimrey, J. Salinger, E. Forland, I. Hanssen-Bauer, H. Alexandersson, P. Jones et D. Parker, 1998 : Homogeneity adjustments of in situ climate data: a review. *Int. J. Climatol.*, 18, 1493-1517.
- Pocard I., S. Janicot et P. Camberlin, 2000 : Comparison of rainfall structure between NCEP/NCAR reanalyses and observed data over tropical Africa. *Clim. Dyn.*, 16, 897-915.
- Rossow W. B. et R. A. Schiffer, 1991 : ISCCP cloud data products. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 72, 2-20.
- Rossow W. B. et B. Cairns, 1995 : Monitoring changes of clouds. *Climatic Change*, 31, 305-347.
- Santer B. D., T. M. L. Wigley, D. J. Gaffen, L. Bengtsson, C. Doutriaux, J. S. Boyle, M. Esch, J. J. Hnilo, P. D. Jones, G. A. Meehl, E. Roeckner, K. E. Taylor et M. F. Wehner, 2000 : Interpreting differential temperature trends at the surface and in the lower troposphere. *Science*, 287, 1227-1232.
- Spencer R. W. et J. R. Christy, 1990 : Precise monitoring of global temperature trends from satellites. *Science*, 247, 1558-1562.
- Tamburini A., 1996 : Étude comparative des mesures d'insolation réalisées à partir des héliographes manuel Campbell et automatique Cimel. Note du SCEM n° 21, Météo-France, Toulouse.
- Tardieu J., 2003 : Radome, le réseau d'observation au sol de Météo-France. À paraître dans *La Météorologie* 8^e série, numéro 40.
- Wentz F. J. et M. Schabel, 1998 : Effects of orbital decay on satellite-derived lower-tropospheric temperature records. *Nature*, 394, 661-664.