

# L'observation atmosphérique, quel avenir ?

**Claude Pastre**

Météo-France - Coordinateur du réseau Eumetnet  
1, quai Branly - 75340 Paris Cedex 07  
claude.pastre@meteo.fr

## Résumé

Cet article pose la question de l'avenir de l'observation météorologique, à la fois comme pratique et comme discipline, d'une part à travers quelques pistes technologiques très récentes, de l'autre à travers l'évolution de l'observation au cours des dernières décennies. L'accent est volontairement porté sur le rôle sans cesse croissant de la modélisation numérique en météorologie.

## Abstract

**Observing the atmosphere; what next?**

This paper deals with the future of meteorological observation as a practice as well as a field, first through some very recent technological projects, then through the evolution of observation during the last few decades. Emphasis is placed on the ever growing part played by numerical modelling in meteorology.

## Comment conclure ?

Après le large tour d'horizon de l'observation météorologique que vous ont proposé ces deux numéros spéciaux, comment conclure ? Je commencerai par mentionner brièvement quelques pistes technologiques actuellement en cours d'exploration, que les auteurs de ces numéros spéciaux n'ont pas eu l'occasion de citer, ou très peu. Ensuite, je tenterai d'analyser l'évolution de l'observation météorologique en tant que discipline.

## La panoplie de Thorpex

On peut découvrir quelques projets novateurs de systèmes d'observation in situ dans les travaux d'équipes de recherche américaines impliquées dans le projet Thorpex (acronyme pour The Hemispheric Observing System Research and Predictability Experiment).

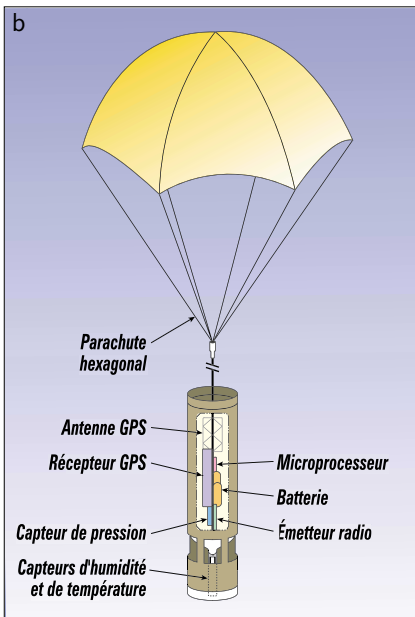
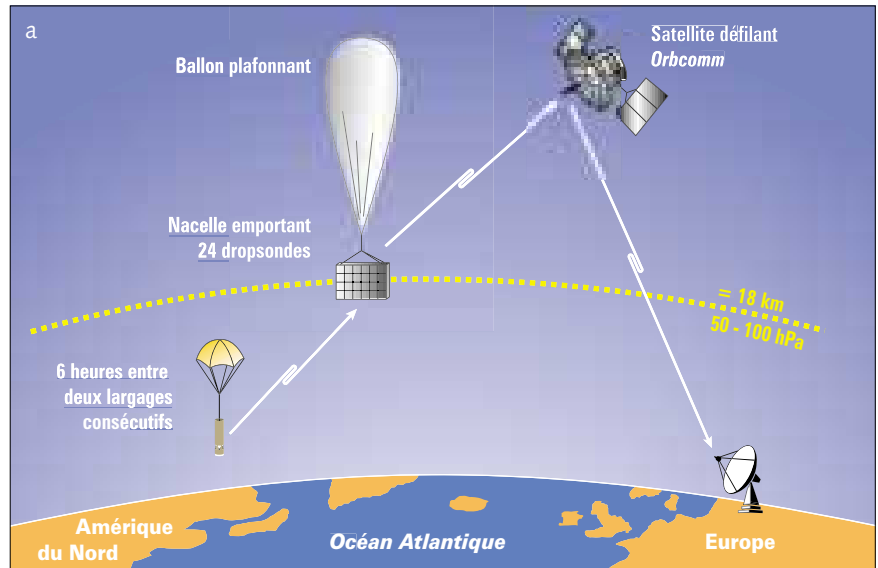
L'un des objectifs de Thorpex (Langland et al., 2001) est de définir, en complément du système spatial d'observation, un système d'observation in situ destiné à résoudre le problème des vastes zones de la planète où l'absence de mesures engendre de grosses erreurs de prévision aux échéances allant jusqu'à trois jours. Dans la lignée des expériences Fastex en 1997 et Norpex en 1998, Thorpex met l'accent sur les techniques instrumentales permettant le **ciblage d'observations** (encore appelé **observation adaptive**, voir Joly, 2003), c'est-à-

dire le recueil de mesures là où elles sont le plus utiles un jour donné. C'est le cas, par exemple, des projets Gains (Global Air-ocean In situ System) et Driftsonde, des bouées porteuses de fusées sondes et des avions sans pilote. Toutes ces techniques tentent de tirer parti des progrès technologiques récents de la localisation par GPS, des télécommunications par satellite et de l'informatique embarquée.

Le projet Gains ambitionne de lancer une flotte de 400 ballons ayant une durée de vie d'au moins un an, plafonnant vers 20 kilomètres d'altitude et emportant une charge utile de **dropsondes** larguées par télécommande pour fournir des profils verticaux du vent, de la température et de l'humidité. En pilotant les ballons en altitude, il serait possible de tirer parti des vents aux différents niveaux pour répartir peu à peu les ballons sur un maillage quasi régulier et quasi permanent de la planète, avec une distance d'environ 1 000 kilomètres entre les ballons. Le concept est séduisant, mais sa mise en œuvre poserait de sérieux problèmes de logistique qui risquent de le rendre financièrement peu intéressant.

Le projet Driftsonde utilise un concept voisin, mais plus modeste – plus réaliste ? Il s'agit de ballons plafonnants plus petits, emportant 24 dropsondes (figure 1) et conçus pour des vols durant cinq à six jours. Lancés depuis les côtes ouest du Pacifique ou de l'Atlantique, ils fourniraient des sondages verticaux dans les zones océaniques favorables au développement des puissantes tempêtes hivernales de nos latitudes (figure 2).

Figure 1 - Le système Driftsonde.  
 a - Schéma général de principe. Toutes les six heures, une dropsonde est larguée automatiquement de la nacelle située sous le ballon plafonnant, à une altitude proche de 18 kilomètres. La dropsonde fournit un profil vertical à haute résolution de la température, de l'humidité, de la pression et du vent (ce dernier paramètre par GPS).  
 b - Schéma de la dropsonde, dont la chute est ralentie par un parachute.  
 (Courtesy NCAR/ATD/RTF)



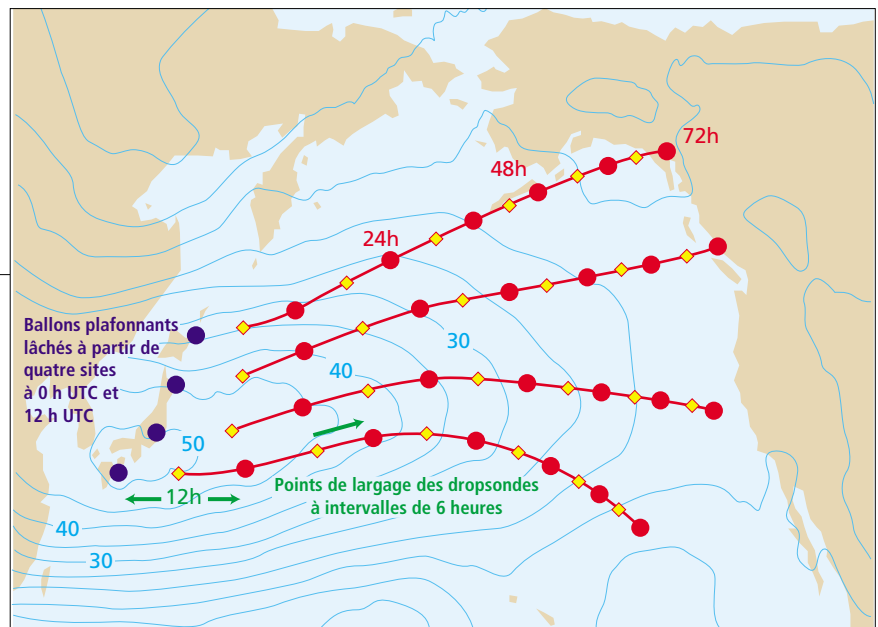
L'idée de remplacer les navires météorologiques stationnaires par des plateformes marines automatiques figurait déjà dans les cartons du service de recherche de l'ex-Météorologie nationale française dans les années 1970. Elle est actuellement reprise au Canada par l'université de Colombie-Britannique, qui propose la *Rocketsonde-Buoy*. Il s'agirait d'une grosse bouée ancrée, capable de faire face à toutes les conditions de mer (figure 3). Elle emporterait 400 fusées capables de propulser une dropsonde jusqu'à 8 kilomètres d'altitude. Pendant sa descente, la dropsonde mesurerait pression, température, humidité et vent. Les lancements pourraient être automatiques ou télécommandés.

Pour terminer cette revue de la panoplie de Thorpex, on mentionnera l'*Aerosonde*, technique qui est à un stade de réalisation plus avancé que les précédentes. Il s'agit d'un petit avion sans pilote, dont le but est également d'aller faire des mesures (pression, température, humidité et vent) là où on le désire (figure 4). Le système a démontré sa capacité à fournir des mesures locales dans des conditions météorologiques peu perturbées. Cependant, malgré une traversée récemment réussie de l'Atlantique par une *Aerosonde*, on ne peut pas encore considérer ce système comme une source fiable de données opérationnelles sur le grand large océanique, du fait de sa fragilité dans des conditions météorologiques difficiles.

## La prise de pouvoir des modèles de prévision numérique

On est frappé par la diversité des matériels qui peuvent être mis en œuvre pour l'observation de l'atmosphère, depuis le thermomètre à mercure jusqu'au lidar embarqué sur un satellite. Pratiquement tous les principes physiques imaginables ont été exploités pour fournir des instruments de mesure, ainsi que tous les vecteurs possibles pour les emporter dans l'atmosphère. Cette diversité induit des problèmes de cohérence, car il est difficile de comparer les estimations d'une

Figure 2 - Exemple de déploiement possible du système Driftsonde à partir du Japon (proposition Thorpex) : couverture de l'océan Pacifique nord en profils verticaux à un moment d'assimilation donné, après trois jours de lâchers de ballons plafonnants depuis quatre sites du Japon. Les points rouges correspondent à la position des profils verticaux obtenus à 0 h UTC (ou à 12 h UTC). Les losanges jaunes correspondent à la position des profils verticaux à 6 h UTC ou à 18 h UTC. Les trajectoires des ballons ont été calculées à l'aide de vents moyennés sur la période janvier-février 1999. Elles sont superposées aux isolignes des vitesses de ces vents moyens à 100 hPa (en m/s). (D'après Langland et al., 2001)



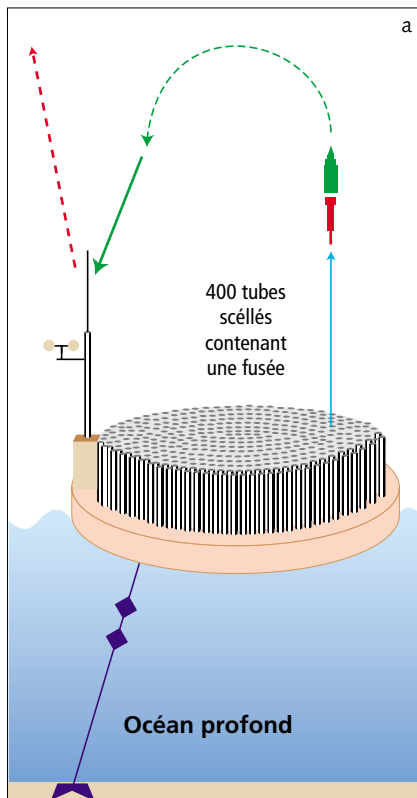


Figure 3 - Le système de « bouée à fusées » (*Rocketsonde-Buoy*).  
 a - Schéma de la bouée ancrée. Chaque fusée fait environ 5 cm de diamètre et 70 cm de long. Elle propulse une dropsonde à une altitude maximale d'environ 8 km. La dropsonde retombe ensuite doucement, tout en transmettant ses observations météorologiques (température, humidité, pression et vent par GPS) à la bouée, qui les retransmet vers un satellite.  
 b - La dropsonde (modèle Vaisala) avec son parachute et ses capteurs.  
 (Courtesy Roland Stull, University of British Columbia, Canada)

même grandeur fournies par des instruments aux caractéristiques météorologiques différentes. Elle induit aussi une incapacité pour l'esprit humain à interpréter l'ensemble des mesures disponibles. C'est ainsi que l'on est peu à peu parvenu à une situation dans laquelle cette interprétation ne peut être que le fait d'un modèle numérique d'atmosphère, porté par un superordinateur et doté d'une ingestion sophistiquée de données.

Torricelli, Pascal, Le Verrier et même, plus près de nous, Bjerknes avec sa théorie du front polaire bâtissaient leurs

théories à partir de l'étude minutieuse et directe des données qu'ils avaient recueillies. Ces temps sont révolus. Cela n'est d'ailleurs pas seulement dû à la diversité et au volume des informations disponibles. Certes, la production quotidienne de mesures satellitaires dépasse ce que l'être humain peut manipuler. Mais, de toute manière, personne ne peut – il ne s'agit que d'un exemple – se faire une idée de la structure thermique verticale de l'atmosphère à partir des mesures du spectre d'émission infrarouge fournies par un satellite, car ce spectre d'émission résulte de façon complexe de l'ensemble des valeurs prises par la température et l'humidité sur la totalité de la colonne d'air.

La nécessité de traiter simultanément le produit de plusieurs instruments de mesure a conduit au concept de **système intégré d'observation** (Champagne, 2003), dans lequel la possibilité d'extraire

l'information concernant un paramètre suppose que l'on dispose en même temps de l'information sur d'autres paramètres. Bien sûr, cette interdépendance n'est pas une nouveauté : n'importe quelle mesure de température de n'importe quel thermomètre est perturbée par le rayonnement provenant du soleil ou des objets voisins du thermomètre. Mais il s'agit d'influences que l'on sait minimiser jusqu'à pouvoir les négliger ou, en tout cas, les corriger facilement. Il n'en va pas de même dans la plupart des instruments de télédétection. Ainsi, dans le sondage satellitaire (Phulpin et al., 2003), déterminer la température à 500 hPa suppose de déterminer en même temps la température et l'humidité à tous les niveaux de l'atmosphère et nécessite de prendre en compte dans le calcul la température de la mer sous la colonne d'atmosphère et les caractéristiques des couches de nuages présentes aux différentes altitudes ; dans ces conditions, plus question de disposer de mesures indépendantes de tous ces paramètres.

Autre exemple dans la détermination automatique du temps qu'il fait (Leroy et Zanghi, 2002) : on mesure la diffusion à des longueurs d'onde optiques ou hyperfréquences pour détecter les hydrométéores atteignant le sol, mais il faut une mesure de température pour discriminer la bruine de la neige.

Ce processus de traitement complexe multiparamètres a éloigné le météorologiste de la mesure et parfois, malheureusement, de la physique de la mesure. Les communautés spécialisées en modélisation et en observation ont longtemps vécu en s'ignorant, si bien qu'il est encore possible de rencontrer



Figure 4 – Une *Aerosonde* au-dessus des nuages. (Image numérique, © Aerosonde Ltd)

des modélistes qui oscillent entre deux attitudes extrêmes vis-à-vis des observations : une confiance aveugle dans les mesures auxquelles ils sont habitués et une méfiance totale à l'égard des nouveaux moyens de mesure.

Ce problème s'estompe heureusement avec l'apparition récente des techniques d'**assimilation variationnelle** des mesures dans les modèles. Celles-ci apportent la possibilité d'introduire dans le modèle numérique d'atmosphère certaines quantités mesurées telles qu'elles sortent de l'instrument. Une version **quadridimensionnelle (4D-VAR)** de cette technique permet d'utiliser les mesures même si elles ont été effectuées en dehors des sacro-saintes heures synoptiques (voir l'encadré ci-dessous). C'est ainsi que l'on pourra utiliser directement une luminance spectrale fournie par un radiomètre spatial, alors que le modèle ne sait manipuler que les paramètres thermodynamiques classiques. Encore faut-il, en l'état actuel de la technique, que l'on puisse se satisfaire d'une

description linéarisée des valeurs de luminance spectrale en fonction des paramètres du modèle.

Depuis l'apparition des techniques d'assimilation, une branche de la modélisation numérique se focalise sur l'exploitation des observations par les modèles. Ses adeptes sont conduits à s'intéresser aux forces et aux faiblesses des systèmes d'observation, car la description des caractéristiques statistiques des incertitudes de mesure fait partie intégrante de la construction du système d'assimilation. Un jour, peut-être prochain, ils seront capables d'estimer la valeur relative du contenu en informations fourni par les différentes composantes du système d'observation et de contribuer ainsi à son optimisation.

À ce stade, on comprend qu'il devient difficile de considérer l'observation météorologique hors du contexte de son usage, sauf à ne s'intéresser qu'à ses aspects purement technologiques et à accepter d'ignorer les possibilités

d'utilisation des mesures. On devine aussi que le beau **Système mondial intégré d'observation**, tel que le théorise l'Organisation météorologique mondiale (Rainer, 2003), est menacé de désintégration : si l'on ne peut détacher la mesure de l'usage qui en est fait, cela signifie qu'il y a potentiellement autant de systèmes d'observation que d'applications différentes.

Déjà, dans la pratique, les systèmes d'observation pour la prévision immédiate et ceux utilisés pour les échéances plus lointaines évoluent de manière distincte, qu'il s'agisse des systèmes au sol ou des systèmes spatiaux. La prévision immédiate, utilisant plutôt des modèles conceptuels, se tourne vers des analyses à mésoéchelle nourries par l'imagerie satellitaire à haute cadence, par les radars détectant les précipitations, par les réseaux de détection d'éclairs et par les stations automatiques à cadence d'acquisition rapide. La prévision aux plus longues échéances dépend essentiellement du réseau de radiosondage et des

## L'évolution des méthodes d'assimilation de données

### Vers une synergie étroite entre observations et modèles

Les premiers modèles numériques de prévision du temps utilisaient les observations de la façon la plus directe : interpolation spatiale depuis les points d'observation vers la grille du modèle, afin de constituer un état initial de ce modèle (**l'analyse**) à un instant donné (généralement une heure ronde, dite **synoptique**). Cette opération d'analyse était assez indépendante de la prévision elle-même, consistant à intégrer le modèle. Elle ne pouvait traiter facilement que des paramètres observés de même nature que les variables du modèle ou s'en déduisant par des lois très simples.

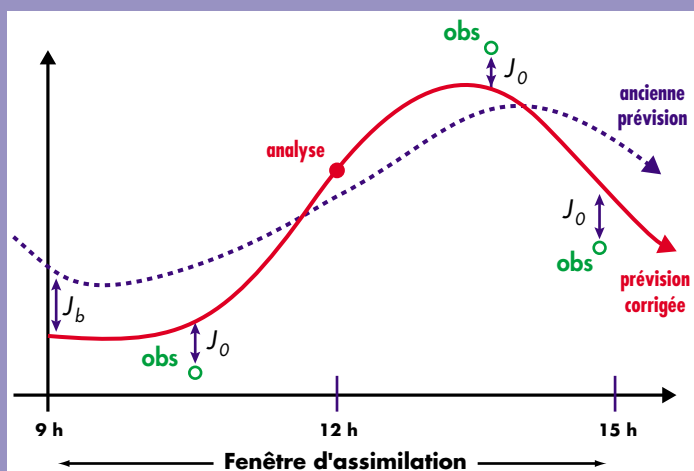
Depuis le milieu de la décennie 1980, le développement des algorithmes variationnels en prévision numérique a considérablement modifié cette situation et a abouti, dans beaucoup de centres, à l'installation opérationnelle d'assimilations variationnelles tri- ou quadridimensionnelles (3D-VAR ou 4D-VAR). Concernant l'usage des observations, deux propriétés méritent d'être signalées :

- La technique variationnelle repose sur un algorithme de minimisation, qui cherche à « rendre petite » la distance entre l'état du modèle et les diverses observations, quelle que soit leur nature, pourvu que ces observations soient « comparables » au modèle. Comparables au modèle veut dire que l'on peut calculer un équivalent modèle de ces observations par un certain opérateur mathématique, raisonnablement linéaire, mais qui n'a pas besoin d'être simple : on peut donc en principe assimiler dans un 3D-VAR ou un 4D-VAR des observations aussi spéciales que des luminances satellitaires ou que le retard de propagation d'un signal GPS.
- L'algorithme 4D-VAR calcule directement, sur une certaine fenêtre temporelle, une **trajectoire** du modèle cohérente avec toutes les observations de la fenêtre (figure ci-dessous). Trajectoire désigne ici une suite d'états atmosphériques produits par le modèle de prévision et donc respectant au mieux la dynamique de ce modèle. L'instant exact de l'observation n'importe pas dans ce contexte, toutes les observations de la fenêtre servant à définir globalement la trajectoire du modèle.

Cette évolution implique que l'assimilation de données est de plus en plus construite « autour » d'un modèle numérique. Ce que l'on demande maintenant à un nouveau système d'observation, c'est de compléter au mieux l'information que l'on a déjà sur l'atmosphère à travers l'assimilation, et non pas d'observer au mieux tel ou tel paramètre météorologique.

Jean Pailleux

Météo-France/CNRM



Principe de l'assimilation 4D-VAR.

satellites en orbite polaire. Autre exemple, la description des nuages dans les messages d'observation Metar pour la météorologie aéronautique conduira probablement à recourir à des observateurs humains pendant encore assez longtemps, alors que la nécessité en a pratiquement déjà disparu pour les autres applications.

Mais l'évolution de l'observation météorologique ne va pas s'arrêter au point atteint aujourd'hui. L'article d'Alain Joly (Joly, 2003) indique le chemin pour une nouvelle étape, celle qui verra le système d'observation devenir un périphérique du superordinateur portant le modèle d'analyse et de prévision. Outre leur rôle pour l'analyse, les méthodes d'assimilation des données permettent d'identifier les endroits où l'information sur l'état actuel de l'atmosphère est la plus nécessaire, les régions où une petite incertitude sur l'état initial pourra induire une grosse erreur de prévision. Ainsi, la figure 5 montre le domaine géographique où, l'été, en moyenne, la prévision à 48 heures d'échéance du CEPMMT pour le Nord de l'Europe est le plus sensible aux erreurs d'analyse. Le domaine ainsi défini a une signification climatologique pour l'ensemble d'une saison estivale. On peut aussi utiliser cette technique en mode prédictif pour savoir où les mesures seront le plus utiles le lendemain. Déjà utilisée à titre expérimental par la NOAA américaine sur l'est de l'océan Pacifique (Szunyogh et al., 2000), cette observation adaptative sera mise en œuvre d'ici à quelques années sur l'Atlantique dans le cadre d'Eucos, le programme de gestion intégrée du système d'observation européen d'échelle synoptique (Gérard, 2003).

Pour plusieurs éléments du système d'observation, l'adaptation de ce système aux besoins du jour pourra même être obtenue sans demander d'intervention humaine : un module logiciel du système d'assimilation-prévision pourra commander à distance les stations automatiques de radiosondage dont une demi-douzaine sont déjà en service en Europe ; il pourra aussi s'interfacer avec le module d'optimisation de l'acquisition des mesures d'avions de ligne (température et vent) du programme E-Amdar d'Eumetnet, qui, à travers les systèmes informatiques des compagnies aériennes, organisera quotidiennement les programmes d'acquisition de ce type de mesures en fonction des besoins.

Notons que cet asservissement du système composite d'observation à la prévision numérique est aussi un facteur de

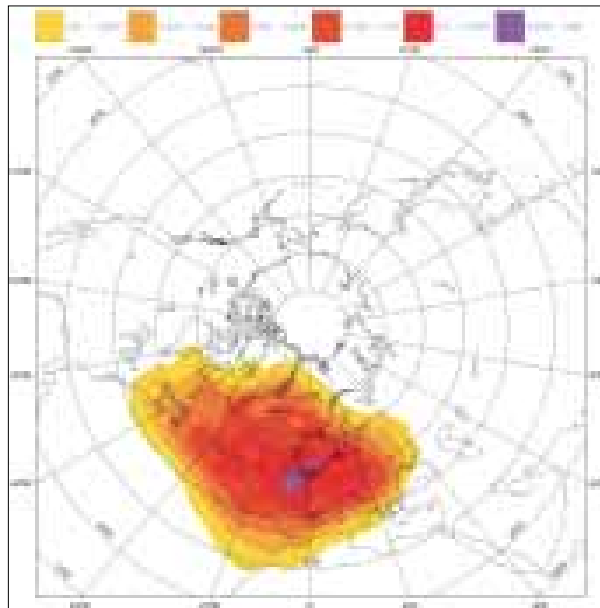


Figure 5 – Climatologie des zones sensibles du point de vue de l'analyse pour une prévision à 48 heures d'échéance (valeur intégrée entre la surface et le niveau 200 hPa). Période : du 30 mai 1999 à 12 h UTC au 29 août 1999 à 12 h UTC. Domaine visé par la prévision : latitudes de 45 à 65 degrés nord ; longitudes de 10 degrés ouest à 35 degrés est. (Figure tirée de Marseille et Bouttier, 2001)

qualité des observations. L'évaluation de chaque mesure (appelée le **monitoring** dans le jargon météorologique moderne) au moment où elle entre dans l'analyse permet d'en détecter les défauts, qu'il s'agisse de biais systématiques ou d'erreurs aléatoires anormalement élevées pour la classe d'observations considérée. Une anecdote célèbre et véridique raconte le cas d'une station de radiosondage dont l'erreur de calage d'orientation par rapport au nord a été détectée grâce au rejet systématique, par les modèles, de ses mesures de vent affectées d'un biais de direction lui aussi systématique.

## Oui, mais...

L'interprétation des mesures à travers le système d'assimilation des modèles numériques peut aussi avoir des conséquences malheureuses. Une mesure révélatrice d'un événement météorologique hors normes peut être rejetée par le modèle si elle s'éloigne trop de l'état antérieurement prévu. Ce type d'anomalie se produit assez facilement dans les zones où la densité d'observations est faible : une observation choquante pour le modèle aura d'autant moins de chances d'être prise en compte qu'elle sera isolée. On risque ainsi de manquer la prévision d'un phénomène dangereux important, à moins qu'un prévisionniste humain supervisant l'analyse ne détecte cette anomalie et ne force le modèle à tenir compte de l'observation qu'il avait rejetée.

Par ailleurs, la spécialisation et le pilotage des systèmes d'observation par leur application principale ne va pas sans

poser un certain nombre de problèmes. D'abord, comme le souligne Joly (2003), il faudra décider qui – quel modèle sur quel ordinateur – pilote le

fonctionnement du système d'observation sur les zones qui commandent la qualité de la prévision à 48 heures sur l'Europe. C'est un problème plus politique que technique que nous pouvons ignorer ici, même s'il promet d'intéressantes discussions. Songeons plutôt au cauchemar du gestionnaire des systèmes d'observation qui devra optimiser l'usage de ses ressources pour satisfaire les besoins distincts et parfois contradictoires des diverses applications (de la prévision immédiate à l'étude du climat en passant par les besoins de l'agriculture, des autoroutes, du tourisme ou de l'aéronautique) aux différentes échelles (du local au planétaire). La gestion éventuelle de plusieurs modèles spécialisés par application et la difficulté d'assurer aux prévisionnistes une maîtrise suffisante de tous ces outils numériques – qu'ils auront à manipuler – ne sont également pas à sous-estimer.

Si l'assimilation variationnelle permet de comparer le contenu en information apporté par différents types de mesures pour les besoins de la prévision synoptique et, à partir de là, d'envisager de pouvoir définir la panoplie optimale d'outils à utiliser à cette fin, on ne dispose pas encore de techniques aussi efficaces pour les autres applications. En la matière, il semble que ce que l'on appelle traditionnellement la climatologie parte avec un handicap. Elle est encore assez largement focalisée sur l'archivage et l'exploitation des séries de mesures des paramètres traditionnels au niveau du sol (température, précipitations, vent) et elle repose encore en grande partie sur des réseaux d'observateurs humains souvent bénévoles (Galliot, 2003). Déjà bousculée par l'automatisation croissante, méfiante

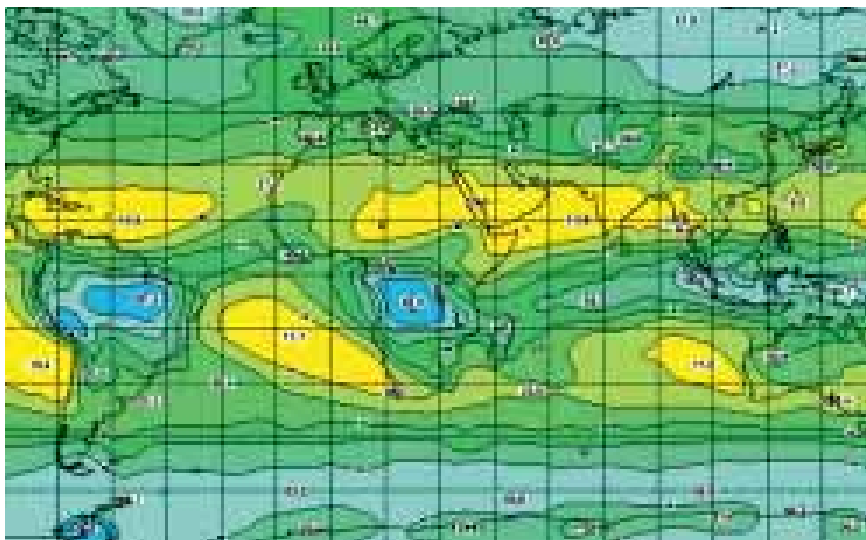


Figure 6 - Réanalyse ERA-15 du champ d'humidité relative de l'atmosphère terrestre au niveau 500 hPa. Climatologie pour l'hiver (mois de décembre, janvier et février). Isolignes et niveaux de couleur tous les 10 % d'humidité relative. Le projet ERA-15 est un projet achevé de réanalyses du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), portant sur la période décembre 1978 – février 1994 (soit à peu près quinze années). Le CEPMMT a lancé un nouveau projet plus ambitieux de réanalyses, ERA-40, portant sur la période mi-1957 – 2001, soit plus de quarante années. (© CEPMMT)

vis-à-vis des mesures satellitaires et de leurs problèmes considérables d'étalonnage et de comparabilité, la climatologie risque d'être mise à mal par des stratégies de pilotage des systèmes d'observation optimisées pour les applications de prévision aux diverses échelles de temps et d'espace.

Comme le notent Bessemoulin et Boucher (2002), la climatologie trouvera peut-être son salut dans l'adoption des techniques d'assimilation des données par les modèles. Les **réanalyses** de situations passées sur des

durées de quarante ou cinquante ans qu'effectuent le NCEP américain ou le CEPMMT européen sont déjà des outils puissants (figure 6). Certes, ces interprétations des mesures ne sont pas sans défaut, en particulier pour les paramètres de surface, car elles véhiculent les défauts du modèle d'atmosphère qui sert à les produire. Elles éliminent notamment – ou à tout le moins prennent assez mal en compte – les phénomènes d'échelle inférieure à la maille du modèle. Mais elles ont par ailleurs beaucoup d'avantages : elles fournissent la meilleure interpolation

possible des mesures dans l'espace et dans le temps ; elles peuvent exploiter des mesures de sources diverses en garantissant leur cohérence ; elles donnent indirectement accès à des paramètres pour lesquels on ne dispose pas de réseaux de mesure satisfaisants. Tout cela peut les rendre mieux à même de satisfaire les multiples usagers de la climatologie, des politiques aux agriculteurs en passant par les spécialistes de l'aménagement du territoire et des règlements d'urbanisme.

## Vers la fin de l'Observation ?

La météorologie opérationnelle est née de la mise en œuvre de réseaux d'observation. Pendant un siècle, l'Observation a régné en tant que discipline souveraine dont tout le reste de la pratique météorologique découlait en s'en accommodant au mieux. Les quarante dernières années d'évolution technique ont renversé la situation. On n'a jamais disposé d'autant d'observations et on n'en a peut-être jamais non plus autant senti le besoin. Pourtant, l'Observation avec une majuscule est en voie de disparition. Elle s'estompe peu à peu derrière une discipline plus vaste, la surveillance de l'atmosphère – voire même la surveillance de l'environnement terrestre – qui réunit les systèmes d'observation et les techniques de modélisation capables d'en exploiter le produit.

## Bibliographie

- Bessemoulin P. et O. Boucher, 2002 : Les besoins en observations pour la climatologie. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 39, 36-42.
- Champagne M., 2003 : L'observation intégrée. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, numéro 40.
- Galliot M., 2003 : Le réseau des observateurs bénévoles en France. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, numéro 40.
- Gérard F., 2003 : Eucos, une stratégie pour l'observation météorologique en Europe. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, numéro 40.
- Joly A., 2003 : Introduction à l'observation adaptative. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, numéro 40.
- Langland R. H., M. A. Shapiro et A. J. Thorpe, 2001 : The hemispheric observing system research and predictability experiment, Thorpex. Proposition au World Weather Research Program - Working Group on Numerical Experimentation de l'OMM. Document consultable à l'adresse Internet [[www.mmm.ucar.edu/uswrp/thorpex/THORpex\\_wmo.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/uswrp/thorpex/THORpex_wmo.pdf)].
- Leroy M. et F. Zanghi, 2002 : L'offre actuelle en capteurs de temps présent. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 39, 65-70.
- Marseille G. J. et F. Bouttier, 2001 : Climatology of sensitive areas for short-term forecast errors over Europe. ECMWF Technical memorandum n° 334, ECMWF, Reading, Royaume-Uni.
- Phulpin T., F. Rabier et L. Lavanant, 2003 : Le sondage satellitaire et son évolution. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, numéro 40.
- Rainer J.-M., 2003 : Le Système mondial d'observation. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, numéro 40.
- Szunyogh I., Z. Toth, R. E. Morss, S. J. Majumdar, B. J. Etherton et C. H. Bishop, 2000 : The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 Winter storm reconnaissance program. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3520-3537.