HAL
open science

La prévision numérique du temps

Marc Bocquet

To cite this version:

Marc Bocquet. La prévision numérique du temps. 2014, pp.48-51. hal-01092941

HAL Id: hal-01092941
https://inria.hal.science/hal-01092941v1

Submitted on 12 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La prévision numérique du temps

Marc Bocquet

Directeur adjoint du Cerea, centre de recherche sur l'environnement atmosphérique de l'École des Ponts ParisTech et d'EdF R&D, et également affilié à l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique et à l'Institut Pierre-Simon Laplace.

5 juillet 2014

Article paru dans la "Revue Technologie", No. 192. 2014, pp.48-51, édité par Christophe Ultré.

De tout temps au cœur des préoccupations des hommes, la prévision météorologique est devenu il y a 150 ans et demeure toujours depuis un défi scientifique majeur à l'impact économique et sociétal considérable. Avec le développement des capacités de calcul ces 50 dernières années, la prévision est également devenue un défi numérique majeur.

1 Prévoir le temps : un défi numérique

À la fin du XIXème siècle, l'école norvégienne de météorologie, avec à sa tête Wilhelm Bjerknes, a posé les bases de la météorologie moderne. L'essor des communications modernes, le télégraphe notamment, a permis la transmission quasi-instantanée des résultats de mesures permettant l'établissement de cartes de pression, de température, d'humidité et de vitesse de vent. La prévision du temps s'est concrétisée dans le développement de l'art du prévisionniste à interpréter ces cartes et à les extrapoler dans l'espace et le temps.

Après la Seconde Guerre mondiale, l'essor du calcul scientifique mais aussi de la mesure par sondage passif ou actif (comme le radar) ont décuplé les ambitions de la prévision météorologique. Il devenait possible de résoudre de façon plus ou moins approchée les équations aux dérivées partielles qui contrôlent la dynamique de l'atmosphère. Ces équations déterminent l'évolution temporelle et spatiale des quantités physiques et chimiques qui décrivent l'atmosphère comme la température, la pression, le vent, l'humidité, etc., autant de quantités qui sont fondamentales pour la prévision du temps. En première approche, il s'agit de résoudre les équations de la mécanique des fluides d'une couche mince de fluide sur une sphère en rotation en équilibre hydrostatique (c'est-à-dire que le gradient de pression vertical du fluide contrebalance la gravité). La comparaison des sorties numériques du modèle, de plus en plus fines, aux cartes de mesures, devenait possible.

2 Les composantes de la prévision

Un cycle de prévision à l'échelle du globe d'un centre météorologique opérationnel est de 6 heures. Voici la description qualitative des composantes d'un cycle de prévision moderne : les observations, un modèle numérique de l'atmopshère et des méthodes mathématiques pour en tirer partie.

2.1 Les observations

L'atmosphère est abondamment observée. Les données d'observation partout sur le globe mais aussi en orbite sont transmises toutes les 6 heures à l'Organisation météorologique mondiale qui les redirige vers les centres de prévision opérationnels. La quantité de données est considérable, environ 10^7 observations individuelles toutes les 6 heures. Il s'agit d'observations au sol (station météo), de sondage par ballon (radiosondage), de mesures sur avion et bateau, de mesures de profileurs comme les radars. Depuis la

fin des années 1970 se sont ajoutées les observations satellitaires dont le nombre a considérablement crû pour atteindre plus de 90% des données effectivement utilisées (plus de 99% des données reçues). Cela a notamment permis une meilleure couverture du globe, et en particulier de l'hémisphère sud (davantage couvert par les océans). Ces données doivent être traitées et filtrées en temps réel. En effet certaines données sont redondantes ou fortement corrélées aux autres, ou bien certaines données sont aberrantes, ou encore la défaillance d'un instrument doit être diagnostiquée.

2.2 Le modèle et sa dynamique

Le modèle numérique météorologique repose sur la discrétisation en trois dimensions des variables de la météorologie dans l'espace réel. C'est-à-dire que l'on réaliser un maillage du domaine d'étude (l'atmosphère). Une variable de température, pression, etc., est attachée à chaque point de grille de ce maillage. En pratique, la discrétisation peut aussi être menée dans l'espace abstrait (de Fourier) des harmoniques sphériques, bien adaptée à la géométrie du globe. La cellule (ou maille) d'un maillage global est de taille typique entre 10 et 50 kilomètres ; l'ordre de grandeur du nombre de variables individuelles dans les centres opérationnels de pointe est de 10^8 à 10^9. On compte une dizaine, ou plus, de variables individuelles par maille. L'intégration numérique du modèle requiert donc de puissants supercalculateurs. Grâce à l'évolution des performances et des architectures des machines de calcul haute-performance (HPC), ces calculateurs sont renouvelés périodiquement pour gagner en précision. Ce gain de performance permet notamment d'accroître la résolution des modèles. Alternativement, le gain de performance peut être dédié à l'enrichissement de la physique du modèle, à sa complexité : évolution des constituants de l'atmosphère comme les gaz à effet de serre, les hydrométéores, la variation dynamique de la densité de l'air, le couplage aux modèles de surface continentale et d'océan qui interagissent avec l'atmosphère, etc. Pour travailler à plus fine résolution encore (typiquement le kilomètre), on développe des modèles régionaux, qui résolvent les plus complexes des équations de la météorologie, permettant notamment la prévision plus fine des précipitations et des événement violents. Par exemple, le modèle Arome de Météo-France délivre depuis 2008 des prévisions sur la France à la résolution de 2,5 km à une échéance de 3 à 30 heures. Grâce à la mise en service du nouveau supercalculateur de Météo-France en 2013 et 2014, la résolution du modèle est passée à 1 km.

Une photographie de ce nouveau supercalculateur est représentée en figure 1. L'augmentation de la puissance de calcul chez Météo-France sur les 20 dernières années est illustrée sur la partie droite de cette même figure.

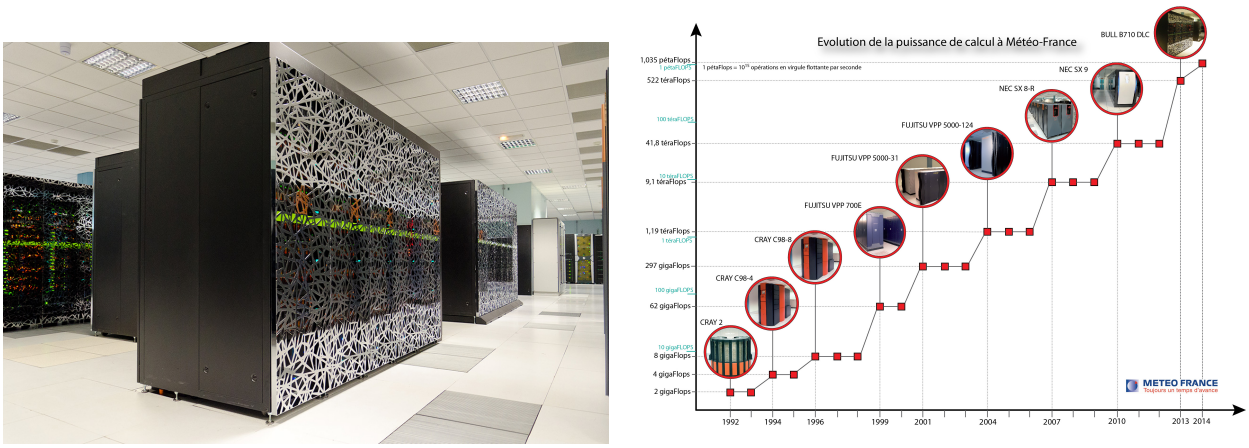
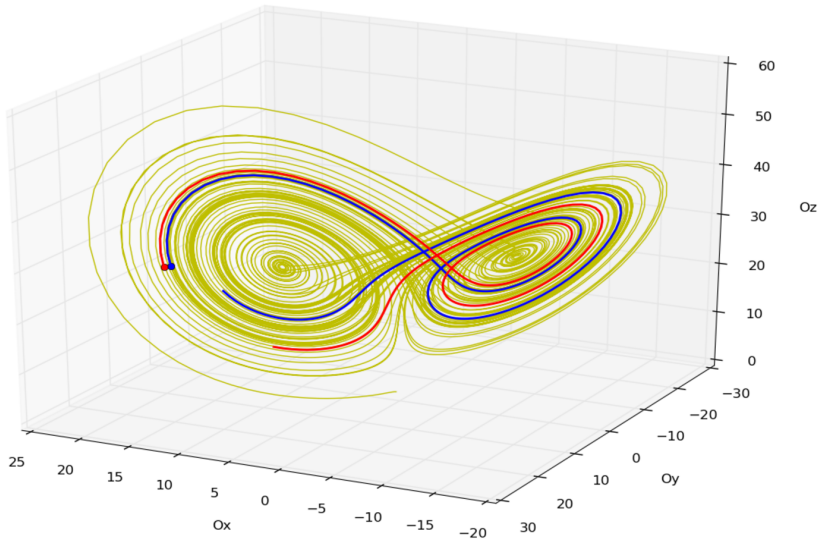


Figure 1: Gauche : vue sur le nouveau supercalculateur Bull de Météo-France. Droite : l'évolution de la puissance de calcul à Météo-France. L'unité FLOPS correspondant à une opération en virgule flottante par seconde. Par ailleurs, un péta = 10^{15}, un téra = 10^{12} et un giga = 10^9, donc 1 pétaFlops correspond à 10^{15} opérations en virgule flottante traitées par seconde. Merci à Alain Beuraud et Jean-Marc Destruel de Météo-France pour ces documents.

À la complexité des équations du système s'ajoutent leurs propriétés mathématiques particulières. La dynamique de ces équations est chaotique, c'est-à-dire que deux états très proches mais distincts de

l'atmosphère simulés par le modèle divergent très rapidement l'un de l'autre. C'est l'effet papillon mis en avant par le météorologue Edward Lorenz en 1963 (voir encadré ci-contre). Donc une petite erreur dans la condition initiale sera très vite amplifiée. Il y a donc en pratique un horizon restreint de prévisibilité, typiquement une dizaine de jours pour une prévision météorologique faite sur le globe.

Une dynamique chaotique



La figure ci-dessus représente deux trajectoires possibles (en rouge et en bleu) d'un point matériel dans un espace à trois dimensions. Le point matériel suit la dynamique du *modèle jouet* dit de Lorenz à trois variables (les trois coordonnées du point matériel). Sa dynamique est analogue à celle d'un vecteur vitesse du vent en un point fixé de l'espace. Dans ce cas, les trois dimensions de la figure ci-dessus représentent les trois composantes du vecteur vitesse du vent.

Les trajectoires rouge et bleue sont initialement très proches (les points rouge et bleu) mais finissent très vite par diverger l'une de l'autre sous l'action de la dynamique, tout en restant confinées dans un domaine limité. C'est typique de ce que l'on appelle le *chaos*. La zone colorée en jaune illustre l'ensemble des points souvent revisités par le point matériel, ce que l'on appelle l'*attracteur* de la dynamique chaotique. Ce modèle jouet est qualitativement représentatif de la difficulté de la très grande sensibilité des modèles météorologiques opérationnels à leur condition initiale qui est causée par la dynamique chaotique. L'ntérêt d'un tel modèle très simplifié est qu'il met en exergue quelques propriétés fondamentales des modèles numériques complexes de prévision du temps, avec un très faible temps de calcul.

2.3 L'assimilation des observations et la prévision numérique

Il est donc fondamentalement nécessaire de recaler la trajectoire du modèle de prévision de façon périodique et fréquente, faute de quoi la prévision finira par diverger très notablement de la réalité. Ce sont les observations qui nous permettent de procéder à ce recalage, en nous donnant une vision riche quoique partielle de la réalité à l'instant présent.

Les techniques mathématiques qui permettent de ré-initialiser de façon optimale le modèle à chaque cycle de prévision sont connues sous le nom de méthodes d'*assimilation de données*. Elle garantissent un recalage théorique *optimal* du modèle ainsi que l'obtention du meilleur compromis entre les observations d'une part et la trajectoire du modèle d'autre part. Ce compromis constitue notre meilleure estimation de la réalité. La mise en œuvre de ces méthodes mathématiques qui ont émergé il y a une vingtaine d'années est elle aussi un défi algorithmique et numérique.

La figure 2 illustre le recalage de la trajectoire du modèle (en bleu) qui est opéré grâce à une méthode d'assimilation. On l'espère le plus proche possible de la trajectoire météorologique vraie (en rouge). Sur cette figure, seule une variable de température dans une maille est représentée ici. Elle est observée dans la durée. Les observations, les points rouges, sont accumulées sur une fenêtre temporelle de 24 heures. Elles ne correspondent pas exactement avec la trajectoire vraie rouge car elles comportent une part d'erreur. On calcule alors un compromis optimal entre ces observations et la trajectoire du modèle, pour obtenir une trajectoire récalée (en vert). Grâce au modèle numérique, cette trajectoire recalée est ensuite propagée par le modèle et devient une prévision (en bleu sur la partie droite).

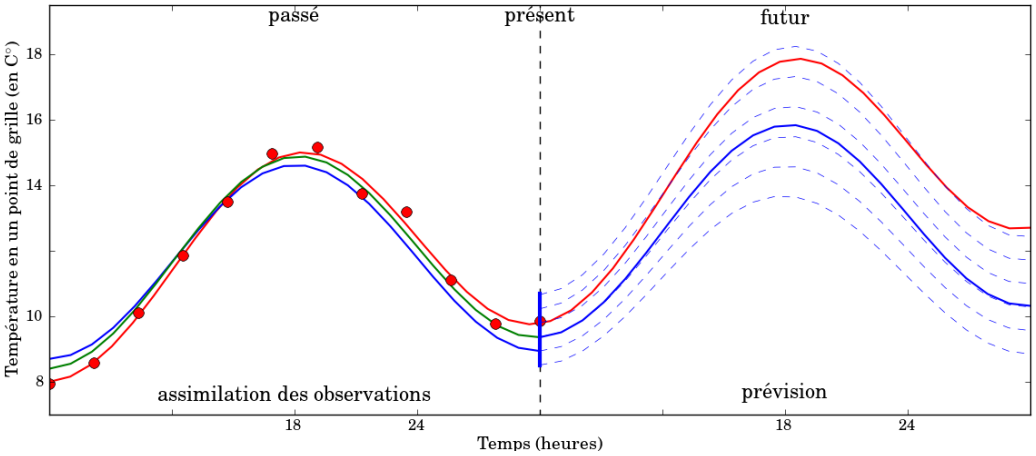


Figure 2: Illustration simplifiée de la mise en œuvre d'une assimilation de données variationnelle.

L'encadré ci-dessous discute des algorithmes d'assimilation de données courant utilisées en météorologie.

L'assimilation de données

Les méthodes d'*assimilation de données* réalisent un compromis statistiquement optimal entre des observations, souvent entachées d'erreur, et une ébauche, c'est-à-dire toute autre information a priori autre que les observations, comme par exemple une précédente prévision numérique. Quelques grandes méthodes ont été consacrées en météorologie sur les 15 dernières années :

- Le 3D-Var : c'est une généralisation du concept des moindres carrés. 3D se réfère aux trois dimensions d'espace et Var au caractère variationnel de la méthode (on minimise une fonction objectif).
- Le 4D-Var : c'est une généralisation du 3D-Var, où en lieu et place d'une régression linéaire entre les observations et l'ébauche, la droite est remplacée par une trajectoire en espace et en temps du modèle. On recherche donc la trajectoire du modèle passant au plus près des observations et de l'ébauche. C'est ce type de méthode qui est utilisée sur la figure 2 : la courbe bleue représente l'ébauche, et la courbe verte représente une trajectoire du modèle qui est un compromis entre l'ébauche et les observations. Cette méthode est dérivée du contrôle optimal développé par l'école française de mathématiques appliquées. On l'appelle aussi parfois *méthode adjointe*.
- Le filtre de Kalman d'ensemble : c'est une variante du filtre de Kalman très populaire en sciences de l'ingénieur (en robotique par exemple), mais la complexité et le coût calcul sont fortement réduit grâce à l'utilisation d'un ensemble de quelques dizaines de simulations, que l'on veut représentatif de l'incertitude dans le système.

En 2014, on s'oriente vers de nouvelles méthodes, dite EnVar, qui combinent astucieusement les avantages du 4D-Var et du filtre de Kalman d'ensemble.

Par conséquent, la complexité des modèles et leur nature chaotique constitue un double défi de calcul

scientifique, et leur implémentation un défi technologique. Une fois l'état de l'atmosphère recalé, il sert de condition initiale au modèle de prévision qui est intégré sur une dizaine de jours pour les meilleurs modèles globaux.

2.4 L'art du prévisionniste

Les prévisions du modèle sont ensuite soumises à l'expérience du prévisionniste. S'appuyant sur son expérience, le prévisionniste peut détecter une anomalie dans la prévision, et le cas échéant la corriger avant diffusion aux clients dont le grand public et les médias. Les prévisions sont ensuite communiquées au grand public, via internet, la télévision et la radio. Elles sont aussi produites à la demande de clients spécifiques, comme l'armée, qui peut utiliser des prévisions météorologique sur le théâtre d'opération. Elles sont aussi fournies aux agences françaises du risque industriel et nucléaire, aux aéroports et aux contrôleurs du trafic aérien, ou aux utilisateurs de prévisions régionales comme les agriculteurs ou aux organisateurs d'événements sportifs et culturels de plein air, etc.

3 La prévision du temps : un succès de la modélisation numérique

On voit donc que trois des étapes de la prévision (observation, assimilation de données, intégration du modèle), constituent des défis scientifiques, numériques et techniques, du fait de la très grande taille des données [1] et du système discrétisé, mais aussi de la nature complexe du système à simuler.

Sur les vingt dernières années la prévision numérique du temps s'est considérablement affinée grâce à l'amélioration des modèles, l'explosion du nombre d'observation et de l'amélioration de leur couverture, et grâce à l'utilisation de méthodes d'assimilation de données toujours plus efficaces. Ces progrès sont mesurés objectivement par des indicateurs statistiques et validés par comparaison aux mesures. Des approches similaires sont aujourd'hui mises en œuvre en océanographie opérationnelle (groupe Mercator à Toulouse) ou en qualité de l'air et chimie atmosphérique. Par ailleurs des disciplines nouvelles envisagent la mise en œuvre d'une telle chaîne de prévision : hydrologie, géophysique interne, météorologie spatiale des vents solaires, glaciologie, climat, etc.

De plus, il est aujourd'hui possible de fournir une incertitude à une prévision déterministe. Par exemple : dans quel intervalle peut-on garantir une prévision de température ? Cette approche offre un cadre probabiliste à la prévision. Elle permet de répondre, quoi qu'avec difficulté, à des questions du type : quelle est la probabilité de précipitation en tel lieu et à telle échéance. L'encadré ci-dessous discute plus en avant la question.

[1] Une problématique typique du très à la mode *big data*, c'est-à-dire l'ensemble des techniques qui pourraient permettre le traitement et l'exploitation de quantités énormes de données.

Le calcul d'incertitude et la prévision d'ensemble

Les erreurs en sciences géophysiques sont souvent plus importantes qu'en calcul numérique des sciences de l'ingénieur. Cela est dû à la sensibilité de la dynamique comme vu précédemment mais aussi aux incertitudes qui affectent toutes les composantes du système à toutes les échelles spatiales et à sa modélisation approchée. Plutôt que de simuler une seule trajectoire de modèle ce qui constitue donc une prévision déterministe, il est apparu ingénieux de calculer plusieurs trajectoires dont les conditions initiales seraient représentatives de l'incertitude que l'on a estimée. On dispose alors alors d'un ensemble de prévision qu'on espère représentatif de l'incertitude de la prévision déterministe. Cette *prévision d'ensemble* permet également de quantifier la probabilité d'un événement (comme une canicule) et de détecter l'émergence possible d'une événement extrême et grave (tempête). Si ce concept est couramment utilisé en calcul scientifique et sciences de l'ingénieur, il est moins évident en météorologie. D'abord chaque simulation de modèle est très coûteuse, même si la prévision d'ensemble est trivialement parallélisable. Ensuite, le concept d'incertitude et de probabilité reste difficile à faire passer auprès du grand public, ou à traduire dans notre vie quotidienne. L'indice de confiance, qui résulte de cette prévision d'ensemble, a cependant été popularisé avec un certain succès par les médias.

La partie droite de la figure 2 illustre une telle prévision d'ensemble : chaque trajectoire bleue tiretée représente un membre (une simulation) de l'ensemble de prévisions potentielles.

Malheureusement ces progrès sont largement ignorés du grand public en France. L'accent est trop souvent mis sur les erreurs de prévision. Nous, Français, n'avons pas collectivement réalisé l'accroissement du niveau d'exigence dans la prévision. Alors que les moyens mis à disposition de Météo-France sont sous pression, et très inférieurs à ceux par exemple du service de météorologie britannique, il est important de rappeler les progrès spectaculaires et le niveau de qualité des prévisions météorologiques, notamment en France et en Europe.

4 Pour finir : de l'intérêt d'introduire la notion de simulation numérique au lycée

Les nouveaux programmes scientifiques et techniques au lycée intègrent de façon significative la simulation numérique comme une étape essentielle qui mène à la conception d'un objet, d'un système ou d'un programme. Cette simulation numérique s'accompagne naturellement d'une confrontation avec le réel par la mesure des écarts susceptibles d'apparaître entre le modèle numérique et le prototype. Nous voyons dans cet article un exemple des applications de la simulation numérique. Ici le réel est le temps qu'il fait, le modèle a-t-il su le prédire ? Notre quotidien est abreuvé de prévisions météorologiques pourtant nous n'imaginons pas forcément que pour parvenir à ces prévisions on fait appel à des ordinateurs de plus en plus performants qui vont simuler le comportement de l'atmosphère dans ses moindres détails. Il en est de même pour la plupart des domaines scientifiques et techniques où la modélisation prend une part importante du processus de création et de réalisation. Par conséquent, grâce à cet exemple, on comprend aisément la nécessité de proposer à nos élèves, à tous les stades de leur apprentissage, cet outil devenu indispensable, qu'est la simulation numérique.