

Séance du 7 mai 2024

Conférence-débat de Florence Rabier avec Jean-Claude André

PRÉVISIONS DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES ET APPORTS DE L'IA

La prévision numérique du temps comporte plusieurs étapes. La première consiste à assembler autant d'observations que possible pour caractériser l'état de l'atmosphère à un moment initial. Puis on combine ces observations avec la connaissance préalable du système, telle que résultant des prévisions antérieures. Les équations décrivant l'atmosphère sont discrétisées sur une grille à l'échelle globale, sur l'horizontale et la verticale. Les prévisions résultent du résultat de l'intégration de ce système numérique discrétisé.

L'une des forces de la météorologie est son ouverture, sa tradition de partage des compétences et de données d'observation. Depuis sa naissance, à la fin du XIX^e siècle, elle n'a donc cessé de progresser avec les technologies de son temps, épousant leur rythme, plus ou moins soutenu.

Si depuis les années 80, le monde de la météo a plutôt vécu une « révolution tranquille », avec des investissements réguliers, une augmentation de résolution des modèles, de bien meilleures observations et une prise en compte progressive de tout le système Terre - et pas seulement de l'atmosphère -, le mouvement s'est nettement accéléré ces dernières années. La révolution digitale a permis aux modèles de suivre les évolutions technologiques des supercalculateurs. La révolution de l'intelligence artificielle, en pleine explosion actuellement, ouvre, quant à elle, la porte à un développement très rapide avec de nouveaux acteurs, et la possibilité d'utiliser des données open source, de véritables données publiques, mises à disposition. Tout le monde aujourd'hui utilise notamment des réanalyses (reconstructions de l'évolution des conditions météo depuis 1940) qui sont des données complètement ouvertes, produites pour l'Union européenne dans le cadre du programme Copernicus. Et les acteurs technologiques jouent le jeu. Nvidia et Huawei, puis Google DeepMind... Après un temps d'hésitation, leur code est désormais en open source. Cette révolution en cours ouvre l'accès à beaucoup de nouvelles données, et permet à beaucoup plus d'acteurs d'entrer dans le paysage.

Florence Rabier. Docteure de l'université Paris VI et HDR de l'université Paul Sabatier de Toulouse, Florence Rabier a assumé des responsabilités dans le groupe « Modélisation pour l'assimilation et la prévision » de Météo-France. Elle a notamment réalisé de nombreux travaux préparatoires à la mise en œuvre du sondeur interférométrique IASI, et contribué au développement d'une méthode innovante d'utilisation des données satellitaires. Pendant l'année polaire internationale (2007-2008), elle faisait partie d'une campagne de terrain en Antarctique sous les auspices de l'OMM. Elle a récemment présidé le conseil scientifique pour les données d'observation de la terre de l'ESA et est membre du conseil scientifique d'IFAB, fondation internationale sur l'intelligence artificielle. Elle est aujourd'hui directrice générale du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme et membre de l'Académie des technologies.

Jean-Claude André. Ancien élève de l'école Polytechnique, Jean-Claude André a été chercheur au sein de l'Établissement d'études et de recherches météorologiques (EERM/Paris) ainsi qu'au National Center for Atmospheric Research et à Oregon State University. Il a été le premier directeur du Centre national de recherches météorologiques (CNRM), puis directeur du Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique. Élu à l'Académie des sciences, correspondant de la section Sciences de l'univers, il est membre fondateur de l'Académie des technologies.

Sommaire

L'état des lieux	2
Les pistes de développement	5
Débats	8

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.



L'état des lieux

Exposé de Florence Rabier

Naissance d'une science

L'histoire commence en 1854, pendant la guerre de Crimée. À la suite d'une tempête qui avait anéanti toute une flotte dans la mer Noire, Napoléon III avait demandé au directeur de l'Observatoire de Paris, puisqu'on pouvait voir arriver cette tempête sur le continent, comment utiliser cette information. L'astronome Urbain Le Verrier avait alors créé un réseau d'observation. Et avec l'avènement du télégraphe, les observations ont pu être partagées. Dans le même temps, le vice amiral Robert FitzRoy faisait à peu près le même travail en Angleterre, en se concentrant, lui, au niveau des ports. Ainsi est née la météorologie moderne.

Aujourd'hui les observations arrivent de toutes parts, sous l'égide de l'organisation de la météo mondiale: avec désormais beaucoup d'observations de satellites, mais toujours les observations classiques comme celles des bateaux, des avions... (figure 1).

La notion de prévisions météo concerne plus que l'atmosphère, notamment quand on les envisage à l'échelle de quelques jours à quelques semaines, avec les autres composants du système Terre, c'est à dire l'océan – non seulement les vagues, mais aussi l'océan profond –, et si l'on veut aller plus loin en prévision, la glace de mer, la terre, la cryosphère avec les glaciers, la neige...

Les mêmes outils peuvent servir non seulement à prévoir le temps, mais également à documenter le changement climatique, et constituer des données d'entrée pour faire des prévisions de débit des rivières et d'inondation, prévoir le risque de feux de forêts, et bientôt estimer les émissions de CO₂ et documenter la qualité de l'air.

Du déterminisme à une vision ensembliste

Les avancées sont magnifiques, mais il y a du chaos dans notre système. Jules Henri Poincaré avait commencé à le décrire en remarquant qu'il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux. Exactement ce que l'on observe dans l'atmosphère. L'idée a été reprise

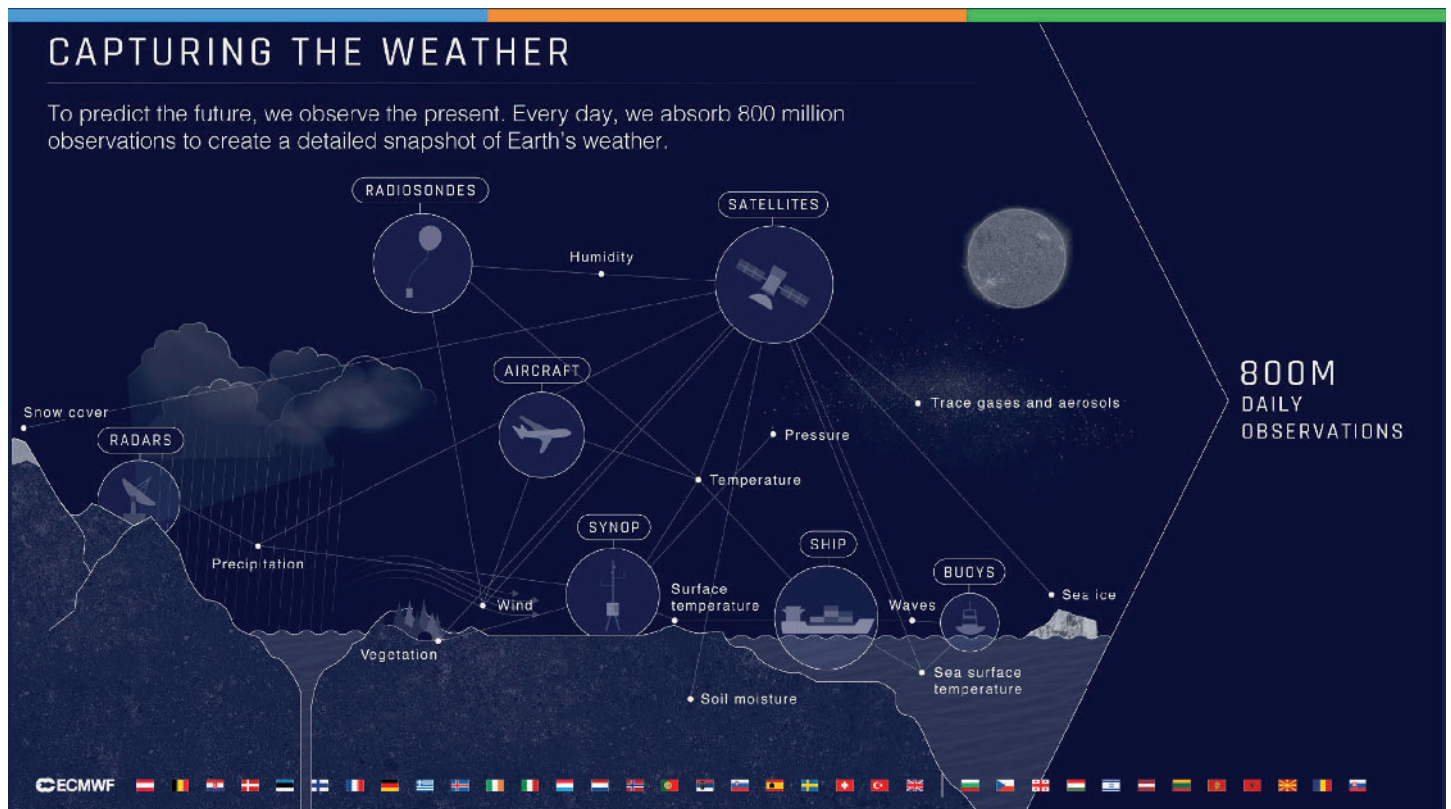


figure 1

plus tard, dans le monde de la modélisation de la météo, par Edward Lorenz avec son fameux « effet papillon » : est ce que le battement des ailes d'un papillon au Brésil pourrait déclencher une tornade au Texas?

Pour tenir compte de ce chaos et être un peu moins déterministe, on fait désormais de la prévision d'ensemble, parfois appelée « Monte-Carlo » : au lieu de déterminer une condition initiale, on documente l'état actuel du système avec 50 réalisations, puis on fait tourner le modèle sur ces 50 réalisations. Et à partir de là, on peut documenter l'état de l'atmosphère dans différents scénarios. À la fin, il appartient aux services météo de faire de leur mieux pour présenter cette information probabiliste de manière simple.

La révolution tranquille

Depuis la fin des années 70, les prévisions météo n'arrêtent pas de s'améliorer, mais sans grands soubresauts. C'est ce qu'on appelle la « révolution tranquille » : une progression vraiment graduelle, avec tout de même le bond en avant qu'ont permis les satellites (figure 2).

Depuis les années 80 jusqu'à aujourd'hui, comme on le voit figure 2, sur le schéma de gauche qui montre la performance

de nos prévisions déterministes, les prévisions à courte échéance, donc à 3 jours, sont meilleures que celles à 5 ou à 7 jours. Parce que les erreurs s'accumulent, et croissent au fil des jours. Mais, on le voit, les prévisions s'améliorent quand même régulièrement. On estime, en général, que l'on s'améliore d'un jour par décennie, c'est à dire que la qualité à 5 jours d'aujourd'hui est la même que la qualité à 3 jours d'il y a 20 ans. Même si l'évolution est très discrète, c'est tout de même exceptionnel de penser qu'on gagne tous les dix ans, un jour de prévisibilité!

Autre évolution à souligner : on observe, autour des années 2000, une quasi convergence des deux courbes pour chaque couleur. La courbe du haut concernant la qualité des prévisions dans l'hémisphère nord et la courbe plus basse, celle dans l'hémisphère sud, on voit bien qu'au départ, les qualités de prévision météo étaient beaucoup moins bonnes dans l'hémisphère sud, où forcément il y a beaucoup moins de données car beaucoup moins de terre, sans compter que nombre de pays ne sont pas aussi riches et développés que dans l'hémisphère nord.

Mais au tournant des années 2000, grâce à la révolution technologique des données satellites, avec l'apparition de nouveaux sondeurs, et surtout de méthodes intelligentes pour les utiliser, les courbes ont convergé. La qualité des prévisions, donc à l'échelle globale, est devenue identique sur les deux hémisphères.

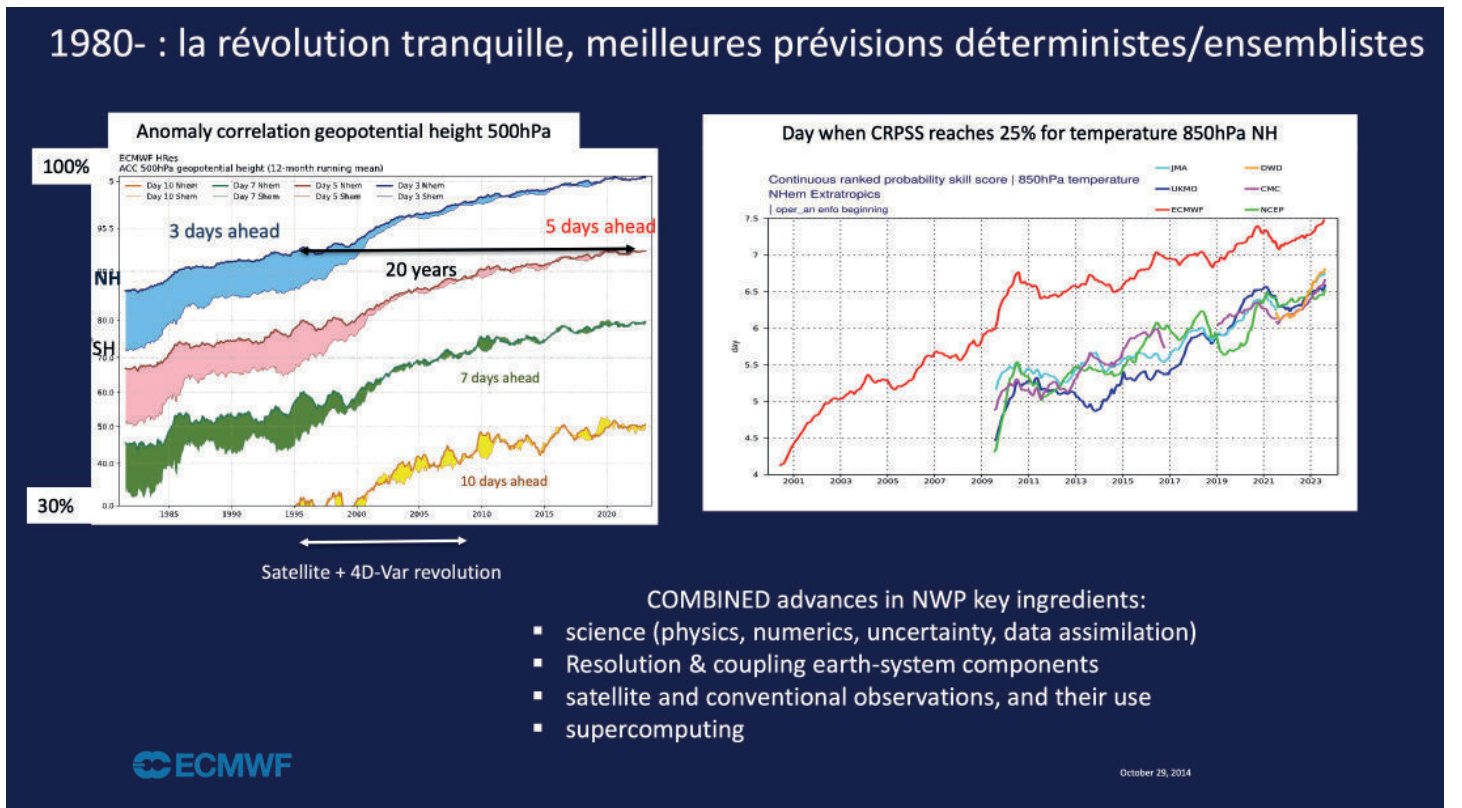


figure 2

Sur le schéma de droite, qui montre le progrès des prévisions ensemblistes depuis les années 2000 jusqu'à aujourd'hui, on voit bien que le modèle du centre européen – la courbe en rouge – est meilleur que celui de tous les concurrents – les courbes du dessous –. Il est meilleur d'environ un jour de prévisions. C'est à dire que nous prévoyons plus loin d'environ un jour dans la moyenne échéance, par rapport aux Anglais, aux Américains, aux Japonais, aux Allemands, aux Canadiens.

On voit là la beauté du système européen qui réussit à mettre en commun des ressources, des moyens et à réunir des gens de toutes parts, avec différents parcours, différentes technologies, différentes idées pour progresser le mieux possible.

Qu'est-ce qui a changé?

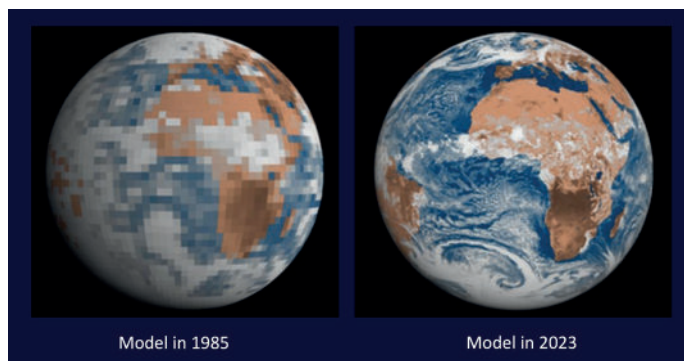


figure 3

Ces progrès sont en partie dus à la résolution des modèles (figure 3). Par exemple, si l'on représente en forme d'image synthétique simulée de satellite, le modèle en 1985 et le modèle en 2020, on voit clairement sur les images ci-dessus que ce qui ressemblait à des pixels il y a quarante ans ressemble vraiment à une image satellite aujourd'hui. En termes de méthodes pour utiliser les données satellitaires, les progrès ont été énormes. Et là, l'honneur revient aux français, pour l'utilisation des données satellitaires avec la méthode 4D-Var – *Four dimensional Variational Data Assimilation* – que j'ai mise en œuvre au Centre européen, et Jean-Noël Thépaut à Météo France, et qui est dérivée du domaine du contrôle optimal, avec de nombreux pionniers en France (Olivier Talagrand, François-Xavier Le Dimet et Philippe Courtier notamment).

Le rôle des signaux GPS

Il s'agit non seulement du GPS terrestre, en général des stations de géodésie qui fournissent des données de contenu intégré en vapeur d'eau dans l'atmosphère, mais aussi des données de radio occultation GPS. Ce sont des sondes en orbite basse qui regardent les signaux d'autres satellites, notamment géostationnaires, et peuvent traduire la perturbation, quand elle traverse l'atmosphère, en température et humidité qui est induite par l'atmosphère sur le signal, en signal pour la météo.

L'impact des différentes données

Il est intéressant de constater que les données conventionnelles - représentées en bleu ciel -, représentent environ 20% en termes d'impact (figure 4). Ce n'est pas énorme, en comparaison des données satellites qui ont beaucoup plus d'impact, mais leur importance est cependant déterminante pour ancrer le système, notamment par la calibration et validation des données satellitaires. On note que les données d'avions – en mauve –, sont aussi de l'ordre de 15 à 20%. De fait, ces données d'avion qui sont des données d'opportunité, – il s'agit d'avions de ligne qui ne volent pas pour la météo –, ont pris énormément d'importance.

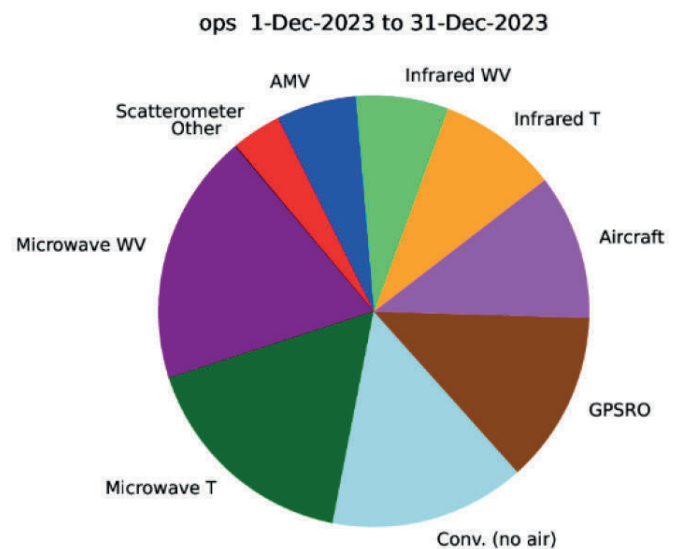


figure 4

Des prévisions pour quoi faire?

Nous avons donc des équations, un modèle, mais surtout beaucoup de données. À plus ou moins long terme, cela nous permet de faire des prévisions mensuelles qui peuvent alerter les services publics notamment sur d'éventuelles vagues de chaleur à anticiper.

À présent, les mêmes outils peuvent servir à faire du suivi climatique. Par exemple, on peut réaliser une analyse rétrospective de la météo depuis les années 40 à partir des différentes données. C'est ce qu'on appelle la « réanalyse », celle d'ECMWF regroupant 300 000 utilisateurs dans tous les pays, tous les continents, et étant citée plus de 200 fois dans le dernier rapport du GIEC. Quand les scientifiques regardent l'état du climat, cela fait office de référence. On peut aussi, quand on a un modèle de prévision, rajouter des traceurs atmosphériques et simuler des trous d'ozone, simuler des aérosols dans l'atmosphère. C'est ce qui est fait avec le service Copernicus européen de suivi de l'atmosphère.

Enfin, ces prévisions servent aussi à faire des prévisions de crues et de débit des rivières. Le système Copernicus Emergency Management Service permet de faire à l'échelle globale et européenne des *early warning*, c'est à dire des prévisions très à l'avance, moins fines que celles des agences nationales et même régionales, mais qui aident à voir arriver à l'avance ce qui se passe dans les grands fleuves, notamment ceux qui traversent les frontières.



Les pistes de développement

Exposé de Florence Rabier

La révolution digitale

Nous avons compris depuis une dizaine d'années qu'il fallait suivre le mouvement général, car la loi de Moore selon laquelle les processeurs allaient doubler de capacité tous les 18 mois, aurait ses limites, et qu'il fallait adapter nos codes pour qu'ils puissent tourner sur des machines différentes, en particulier avec des processeurs graphiques. Au centre européen, par exemple, nous tournons sur un système Atos, où nous avons quatre clusters indépendants pour plus de résilience et donc au total, nous avons environ 1 million de corps (des CPU) et environ 128 GPU. C'est déjà un gros système (35 Petaflop). Si l'on combinait nos quatre clusters, nous serions environ numéro 26 dans le top 500 des plus gros ordinateurs mondiaux. Et nous avons aussi une archive énorme de 1 exabyte. Si l'on veut faire mieux, il va nous falloir un outil beaucoup plus puissant.

Pour aborder la révolution digitale, plutôt que de continuer aveuglement avec nos gros codes en Fortran, et d'augmenter la résolution spatiale, d'avoir plus de complexité, plus d'ensemble..., nous devons tenir compte de pas mal de contraintes, du temps et de l'énergie nécessaires pour arriver à la solution. Il faut que notre code soit portable pour pouvoir tourner sur des machines qui ne sont pas que des CPU, des machines avec des processeurs conventionnels, mais des machines avec des accélérateurs, dont les processeurs graphiques. Il faut avoir une certaine résilience.

Nous avons donc travaillé à faire en sorte que notre code soit prêt pour le futur, quel que soit ce futur : pour les nouvelles machines, en particulier les processeurs graphiques. Cela demande de séparer une couche algorithmique où les scientifiques peuvent avancer sans s'occuper de tous les dessous, d'une couche qui va optimiser pour différentes architectures. C'est un travail de longue haleine, d'optimisation et de réécriture du code avec des structures de données différentes..., qui nous permet d'optimiser, par exemple, la librairie qui fait les transformées spectrales.

Par exemple aussi, on peut toujours optimiser selon qu'on va utiliser des langages différents, selon qu'on va combiner des CPU, des GPU... Et pour cela, il est très utile de travailler avec l'industrie, en particulier avec Nvidia qui fournit des processeurs graphiques.

Nous avons donc de plus en plus de partenaires en technologie : un centre d'excellence avec Atos, soutenu avec d'autres de ses partenaires, dont Nvidia, mais aussi la compagnie privée Maxar, pour porter notre code sur Amazon WebServices (AWS). Nous travaillons également avec des gros centres de calcul comme par exemple Oak Ridge National Lab qui détient l'un des plus gros calculateurs. C'est là que nous avons fait nos premiers essais pour faire tourner un modèle global à un kilomètre de résolution. Ce qui nous a valu un prix de la meilleure utilisation de l'HPC en sciences physiques.

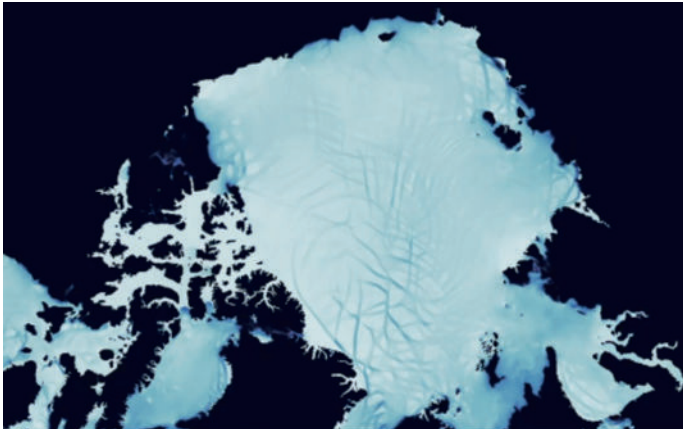


figure 5

Quand on voit l'image de la figure 5, on a vraiment l'impression d'y être : c'est la glace de mer qui respire. On voit des crevasses qui se forment, on voit la vapeur d'eau, les vents avec les rafales sur l'Europe qui prennent en compte toutes les vallées, les côtes... Ce résultat – obtenu dans le cadre d'un projet européen –, c'est ce qu'on aimerait faire tourner en temps réel. Mais cela prend énormément de temps.

Avoir plus de résolution, donc plus de puissance de calcul, c'est notre objectif. En travaillant sur des accélérateurs, plutôt que de travailler à l'aveugle, de manière un peu brutale, avec de plus en plus de processeurs, sachant qu'au bout d'un moment, cela a ses limites.

La révolution de l'apprentissage automatique

Les avancées

Pour l'instant, nous travaillons avec de la modélisation conventionnelle basée sur la physique : nous faisons de « l'assimilation de données », avec des relations entre les données des conditions initiales, de la modélisation physique et des prévisions en systèmes ensemblistes. En 2020, on a décidé de faire une stratégie d'apprentissage automatique, pour aller vers une simulation hybride. Nous aurons donc toujours notre simulation physique, mais l'apprentissage automatique va nous aider pour l'assimilation de données, pour améliorer ou accélérer des processus dans la modélisation, pour interpréter les données...

Nous allons donc glisser de l'apprentissage automatique un peu partout dans notre chaîne, notamment pour l'assimilation de données. Et faire en sorte d'utiliser les données satellites de manière plus brute, pour faire de la détection d'anomalies si les instruments commencent à dévier, essayer d'analyser ce qui se passe pour améliorer notre détection des nuages... Nous avons déjà commencé, avec succès !

Un peu plus novateur, consiste à utiliser l'apprentissage automatique pour déterminer l'erreur du modèle et appliquer cette erreur de modèle dans les prévisions. Pour l'instant, on sait que notre modèle n'est pas parfait, mais on fait des prévisions à partir des données, et rétrospectivement, on trouve comment ajuster le modèle. On l'améliore en post-traitement donc. Mais on se penche sur cette solution nouvelle : corriger le modèle pendant qu'il tourne.

L'idée la plus radicale, c'est de carrément remplacer le modèle physique par un modèle d'intelligence artificielle. Depuis 2022, on assiste à une vraie émergence du phénomène. Les modèles de météo provenant de l'IA commencent à avoir des performances tout à fait satisfaisantes.

Nous avons évoqué plus haut la réanalyse : on repart donc de 1940 et on obtient une image de l'atmosphère dans toutes ses dimensions, toutes les heures depuis 1940. Tous les centres de technologie utilisent cette mine de données pour faire l'apprentissage. Et les résultats sont étonnants.

Les applications

Toutes ces avancées sont précieuses pour réduire le temps de calcul. Une prévision du Centre européen à haute résolution, c'est 180 000 unités de calcul. Mais si l'on fait tourner un modèle d'apprentissage automatique, on tombe à 0,3 unités. C'est quand même très prometteur !

Z500 (ACC at Day 5): 3-monthly running mean – nouveaux acteurs

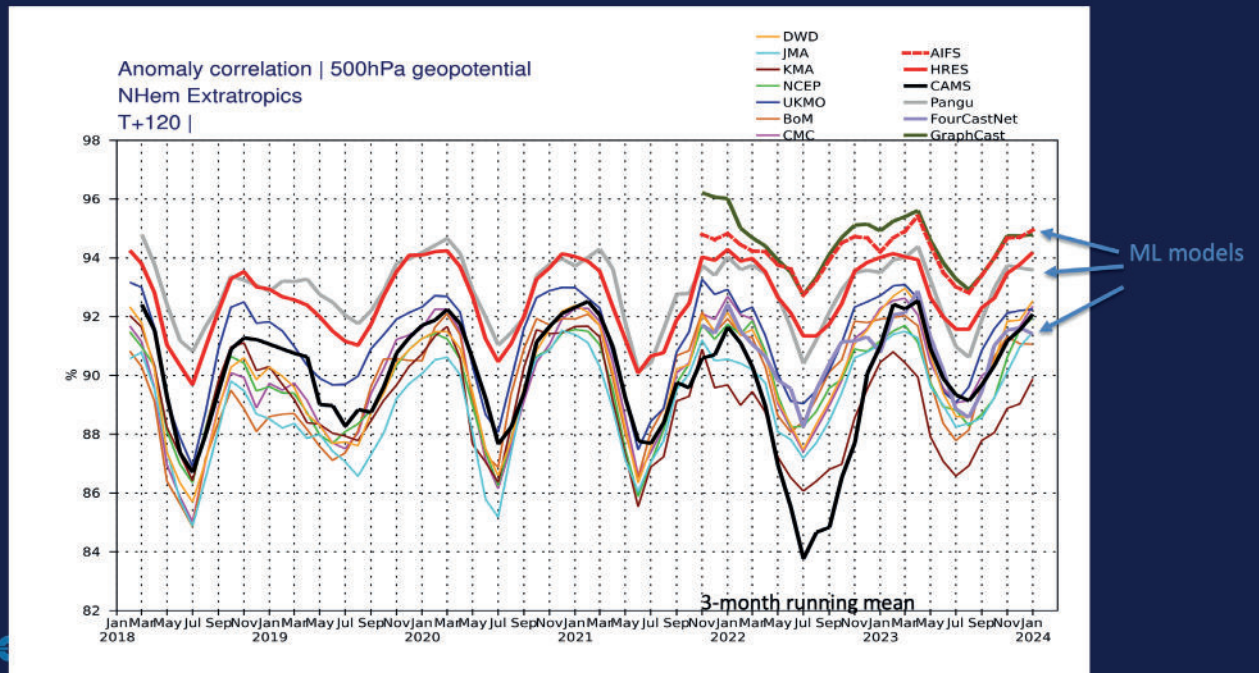


figure 6

Quand on regarde les scores (figure 6), moyennés d'année en année, notre modèle basé sur la physique est celui en rouge (HRES) vers le haut, mais l'on constate que certains modèles d'apprentissage automatique font encore mieux : notre propre modèle (AIFS) et celui de Google Deep Mind (GraphCast). Ces modèles ont été développés depuis moins de deux ans et déjà ils surpassent les modèles traditionnels, c'est absolument extraordinaire.

Ensuite, il y en a qui font aussi bien que les compétiteurs qui font tourner leurs modèles globaux conventionnels de prévision numérique.

Destination Earth est une initiative de la Commission européenne qui combine tous ces éléments, et va du mieux possible dans le sens de cette révolution numérique, en faisant tourner sur des gros calculateurs des modèles physiques à haute résolution utilisant aussi de l'apprentissage automatique pour faire des « jumeaux numériques » de la Terre. Autrement dit, on va tourner à très haute résolution pour avoir une très bonne qualité d'information avec une granularité fine, et faire du co-design. Donc travailler avec les utilisateurs pour faire intégrer les applications dans le code. Cela permettra aux différents secteurs d'activité d'avoir des simulations plus fréquentes, plus flexibles, et d'adapter la manière de fournir les données. Nous sommes trois acteurs dans le projet : ECMWF, Eumetsat (l'organisation intergouvernementale pour fournir des satellites météo opérationnels), et l'Agence spatiale européenne. Il existe une plateforme pour accéder aux données,

un espace de stockage où seront placées toutes les données, et deux jumeaux numériques de la Terre qui seront par la suite agrémentés de plusieurs autres jumeaux. L'un des deux sera utilisé pour l'adaptation au changement climatique et l'autre pour les prévisions beaucoup plus fines. En partenariat avec le Centre de Finlande pour les supercalculateurs, pour le jumeau lié au changement climatique, et Météo-France pour le jumeau numérique de météo pour les événements extrêmes.

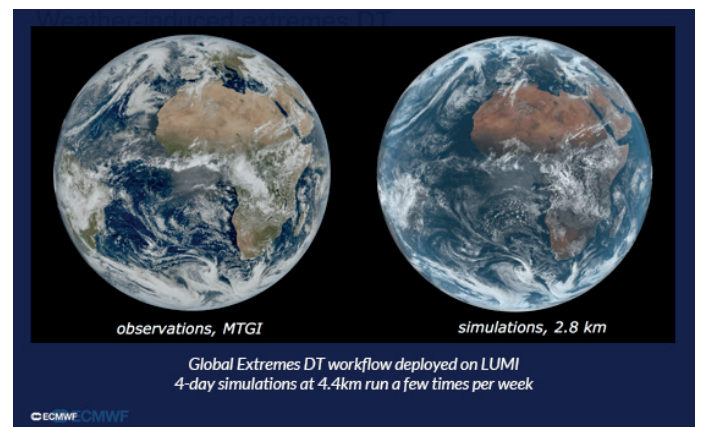


figure 7

Figure 7, à droite, on a fait tourner à 2,8 kilomètres de résolution un modèle par rapport aux dernières observations MTG d'Eumetsat. Difficile de reconnaître laquelle de ces deux images correspond à l'observation et laquelle à la simulation.



Débats

On entend souvent à la radio, en ce moment, que Météo France donne nombre de prévisions fausses, que les paysans râlent, que d'après les syndicats, il n'y a pas assez de gens pour observer... Que se passe-t-il, au juste ?

Florence Rabier : Météo-France a opéré une transition, ces dix dernières années, au cours de laquelle des stations ont effectivement été supprimées, partout dans le pays. Nous sommes l'un des derniers pays d'Europe à faire cette transition. On s'était rendu compte que la météo de proximité, avec un service dans chaque département, n'était pas le plus optimal quand les progrès des technologies permettent de centraliser les prévisions qui sont ensuite discutées en service régional. En prenant ce virage, il a fallu couper des stations, plus de gens ont été placés dans les services centraux et c'est vrai qu'il y a eu des coupes de personnel. Mais il y a plus d'outils automatiques qui permettent d'accompagner les ingénieurs et techniciens pour effectuer leur travail d'analyse en utilisant toute la richesse des produits numériques. Certains de ces outils venant à peine d'être déployés, ils ont eu encore quelques petites bugs, mais ils sont constamment améliorés. C'est un processus normal de déploiement de nouveaux systèmes et cette transformation va dans le sens du progrès.

Est-ce que les militaires s'appuient sur vos données ou ont-ils des services de météo indépendants ?

Florence Rabier : En tant que centre européen de prévision, nous donnons les données aux services météo et c'est eux qui ont des liens avec les militaires, qui ont aussi leur propre service de météo mais se reposent beaucoup sur les prévisions des services nationaux et les nôtres également.

Un dirigeant important de la NASA qui s'occupe de changement climatique a déclaré qu'on ne comprenait pas une anomalie de l'augmentation récente de température terrestre avec des pointes à plus 2 degrés sur certaines régions, alors que d'après le GIEC, on attend plutôt 1 ou 2 degré aujourd'hui en moyenne. De même, à propos des anomalies qu'on a observées cet été, dont on nous répète qu'elles sont mal expliquées, sur la température des océans. Avez-vous des réponses là-dessus ?

Florence Rabier : Un autre grand climatologue américain a répondu que c'est tout à fait dans les normes, d'enregistrer une anomalie plus importante. En fait, ce que l'on observe, c'est dans la tranche de ce à quoi on pouvait s'attendre. C'est dans la tranche haute, mais ce n'est pas complètement en dehors des marges de ce que les modèles climatiques pouvaient simuler. Alors, est-ce que c'est le début d'un véritable changement ou est-ce cela va encore accélérer avec une pente encore plus forte ? C'est ce qu'on ne sait pas.

Une des positions qu'on a prises à l'Académie, dans un rapport pour France 2030 consiste à dire : il faut faire de l'IA de confiance, et la bonne façon de faire de l'IA de confiance, ce n'est pas de faire de l'explicabilité parce qu'on est dans le monde de la déduction, des statistiques, de la corrélation et pas de la causalité, mais de faire en sorte d'encadrer les prévisions par les modèles. J'ai l'impression que c'est vraiment une valeur en France et en Europe qu'on peut exploiter parce qu'on est bon en modélisation. Et c'est visiblement ce que vous faites : des méthodes hybrides, de machine learning croisé avec des méthodes de modélisation...

Florence Rabier : Absolument. Même si l'on ne sait pas exactement comment on va combiner tout cela. C'est ce qui rend notre discipline magique aussi : tout est ouvert. Par exemple, nos scientifiques rêvent de faire des prévisions d'ensemble avec 1000 membres, pour vraiment avoir toute la PDF de la distribution. Et ça, on peut le faire avec du machine learning, pas avec nos modèles physiques. Mais en même temps, il va être absolument essentiel de continuer à garder quelques simulations vraiment ancrées sur le physique.

Et vous avez aussi 80 ans de données de bonne qualité, et des quantités astronomiques de données. Le machine learning aime bien ça.

Florence Rabier : Finalement, on était un bon cas d'école.

Mais est-ce représentatif du futur ?

Florence Rabier : Du futur proche oui. Du futur lointain, peut-être pas.

Jean-Claude André : Je suis un tout petit peu plus réservé que Florence sur les espoirs que font naître les apprentissages profonds. L'apprentissage profond, ça se mérite et ça ne fait pas tout.

Techniquement, c'est extraordinaire mais je pense que scientifiquement, cela n'a pas désarmé beaucoup des réflexions sur les phénomènes physiques qui pilotent le climat et qui pilotent l'évolution de la météorologie. Mais c'est peut être le biais d'un ancien, comme moi, qui a passé trop de temps à se battre avec Navier-Stokes.

Florence Rabier : Mais moi j'ai un autre biais, c'est que je mène une espèce de croisade depuis janvier dernier pour faire accepter l'apprentissage automatique à la fois à mes collègues et à ceux qui vont nous donner de l'argent pour se lancer à fond là dedans. C'est peut-être un peu trop mon cheval de bataille, et j'aborde le sujet avec enthousiasme parce que c'est quelque chose sur lequel il va vraiment falloir qu'on investisse si l'on ne veut pas laisser la place à Google et aux autres géants numériques. Mais effectivement, le message aux décideurs est beaucoup plus mitigé, parce qu'il ne faut pas du tout relâcher l'effort sur la simulation physique qui est absolument essentielle. Si je parlais à des ministres pour savoir où investir l'argent, je dirais qu'il faut continuer à garder de très bons modèles physiques sur lesquels ancrer ces modèles de type de machine learning. Mais nous avons été tellement sidérés par la rapidité des progrès que nous nous sommes dit qu'il n'était pas question de rater le tournant. C'est ce qui explique mon enthousiasme.

Mots-clés : données satellitaires, IA et météo, machine learning et météo, méthode 4D-Var, prévision numérique du temps, Urbain le Verrier

Citation : Florence Rabier & Jean-Claude André. (2024). *Prévisions des conditions environnementales et apports de l'IA*. Les soirées de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions de l'Académie des technologies sur notre site [academie-technologies.fr](https://www.academie-technologies.fr)

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44

Production du comité des travaux.

Directeur de la publication : Patrick Pélatà

Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel

Auteur : Marie-Claude Treglia

N°ISSN : en attente