

Comprendre et utiliser les modèles de prévision numérique du temps

Introduction pour les pilotes de parapente



Samy Gallego

20 Novembre 2025



Introduction

- Ce que vous ne verrez pas dans cette présentation :
 - des notions théoriques de météorologie, d'aérologie, de turbulence, comment lire un emagramme, ... (ie. [présentation d'Augustin M.](#))
 - Les différents régimes de temps et où voler en fonction (ie. [Présentation de Pascal C.](#)),
 - Des belles images et vidéos de cross, Maurer en peignoir dans un hôtel 4 étoiles,... (ie. Peter V. K.)
- Ce que vous verrez (1h + 30 min) :
 - comment marchent les modèles météos, qu'est-ce qu'on peut attendre d'eux, leurs limites,
 - comment les utiliser en pratique pour faire une bonne prévi (pas de diapos, description de mon site web en live et improvisation),

Plan

- 1. Observations vs Prévisions**
- 2. Comment fonctionnent les modèles**
 - 2.1 Lois Physiques et équations aux dérivées partielles
 - 2.2 Discrétisation : grille espace / temps
 - 2.3 L'état initial : l'assimilation de données
 - 2.4 Besoin de supercalculateurs
 - 2.5 Modèles globaux vs aire limitée
- 3. Limites des modèles**
 - 3.1 Théorie du chaos
 - 3.2 Prévision d'ensemble
- 4. (Prévision et Intelligence Artificielle)**
- 5. En pratique : que livrent les modèles et comment les utiliser ?**

Observations vs Prévisions(1/3)

- Anecdotes : ne pas confondre observations et prévisions...
- Les **observations** sont les mesures actuelles et passées de l'état de l'atmosphère. Aux erreurs de mesure près, cela représente la "réalité". Deux types de mesures :

Observations officielles calibrées normes OMM, publiques

- Stations centres officiels SYNOP (thermomètre, pluviomètre, anémomètre, baromètre), ex : [sur Meteociel](#),
- METARs aéroports, ex : [aéroport Blagnac sur Windy](#),
- Radars mesurent réflectivités, Météorage les impacts de foudre,
- [Radiosondages avec ballons](#),
- Navires et Bouées, avions (via AMDAR),
- Satellites (mesurent radiances, peuvent mesurer vent sur mer...).

(Nous verrons comment toutes ces données sont utilisées dans les modèles de prévision.)

Observations vs Prévisions(2/3)

Observations non officielles, publiques ou non

- réseau FFVL : exemple [Vent à Cornudère en ce moment](#)
- Pioupious sur [Openwindmap](#)
- Ma station sur mon toit, la webcam de [Pascal](#), de [Jean](#), ...
- Nombreux biais dans ces données, pas de calibrations...

(Ces données sont utiles mais non utilisées dans la prévision numériques.)

Observations vs Prévisions(3/3)

Les **prévisions** sont des projections dans le futur à l'aide de **modèles numériques** (on essaye de se rapprocher de la "réalité" future).

Différents types de prévis

- Prévisions "brutes" sorties directement du modèle.
Exemple : vent ECMWF pour demain 14h à Gensac,
- Prévisions avec post-traitement "automatique".
Exemple : comparaison des modèles sur MB avec pictogrammes.
- Prévisions "expertisées" par humains.
Exemples : TAF aéroport de Toulouse, cartes TEMSI France (mon boulot!).

D'après vous, quel type de prévision pour : le bulletin de TF1, de France télévision ? le rapport texte météo de Meteoblue pour Arbas ? Site Météo-France ?

Comment fonctionnent les modèles ?

- On utilise les lois de la physique : mécanique des fluides (**équations de Navier-Stokes** pour la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie), lois de thermodynamique, rayonnement,...
- Ces équations s'écrivent sous forme d'équations aux dérivées partielles (les variables sont la température T , la pression (P), la densité (ρ), l'humidité (h), le vent ($\vec{v} = (u, v, w)$), qui dépendent de la position (x, y, z) et du temps t ...).

Exemples : équation conservation de la masse :

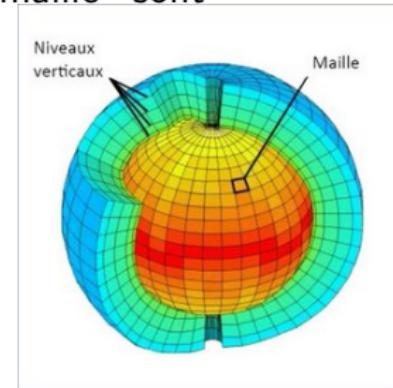
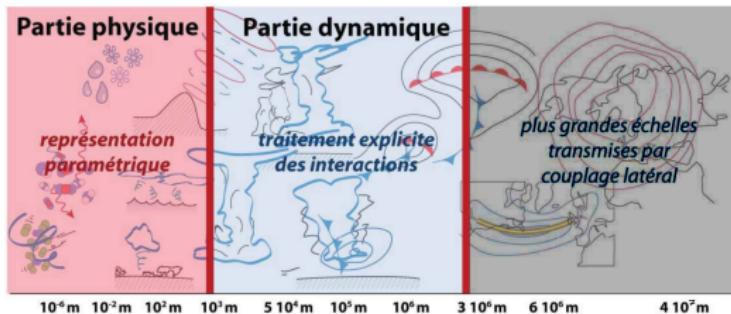
$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0, \text{ avec } \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right).$$

Équation des gaz parfaits : $P = \rho R_s T$ avec $R_s = 287$.

- Impossible de les résoudre à la main → on les approxime sur une grille à l'aide d'un ordinateur.

Discrétisation : grille espace / temps

- On découpe l'atmosphère en petits volumes (**mailles**) et on utilise un **pas de temps** (les deux sont liés pour des raisons de stabilité des schémas numériques) : $\frac{d\rho}{dt} \approx \frac{\rho(t+\Delta t)-\rho(t)}{\Delta t}$, $\frac{\partial}{\partial x} \approx \dots$
- Sur chaque maille : on calcule vent, pression, humidité, température, pour un pas de temps et on passe au suivant.
- Plus la maille est fine, plus la prévision peut être précise et permet de représenter plus de phénomènes physiques, mais plus c'est long.
- Certains phénomènes physiques "sous-maille" sont **"paramétrés"** (ex : thermiques !).



L'état initial : l'assimilation de données

- Le modèle tourne plusieurs fois par jour (**runs**) et part d'un **état initial** → il doit être le plus réaliste possible.
- L'**assimilation de données** combine les observations (officielles) avec une prévision d'un run précédent (ébauche) pour créer un état cohérent : problème mathématique d'optimisation pour chercher **meilleur compromis entre ébauche et observations**.

$$\mathbf{x}_a = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_b\|_{\mathbf{B}^{-1}}^2 + \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathcal{H}(\mathbf{x})\|_{\mathbf{R}^{-1}}^2$$

avec :

- \mathbf{x} : vecteur d'état du modèle (température, vent, pression, humidité, etc.) ;
- \mathbf{x}_b : ébauche ;
- \mathbf{y} : vecteur des observations (stations, satellites, radars, etc.) ;
- \mathcal{H} : opérateur d'observation, qui simule les observations.
- Etape cruciale : mauvaise analyse = mauvaise prévision.
- Rq : AROME PI (prévision immédiate) avec assimilations + fréquentes visible sur Meteociel.

Besoin de supercalculateurs



- A MF, 2 supercalculateurs Belenos et Taranis secouss l'un de l'autre ($20 \text{ Pétaflops} \approx 20 \times 10^{15} \approx 20 \text{ millions de milliards de calculs par seconde}$) pour résoudre les équations sur des millions de points.
- Plus le modèle est fin et va loin dans le temps, plus il faut de puissance.

Modèles globaux vs aire limitée (1/2)

Les modèles qui ont pour domaine le globe entier ont forcément une maille assez grossière (autour de 10km), qui ne permettent pas de résoudre la convection. Dans l'équation du mouvement vertical :

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g,$$

~~$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g,$$~~

on néglige l'accélération verticale, on suppose que force d'Archimède et poids s'équilibrivent, c'est l'**équilibre hydrostatique**.

Exemple de modèles globaux (hydrostatiques)

- Chez MF : ARPEGE (maille 5 km à 24km/pas de temps : 6 min; prévi à 4/5 jours),
- Modèle européen du CEP : ECMWF parfois appelé IFS ou CEP (9km/10min; 10 à 15 jours),
- Modèle allemand : ICON (13km/7.5min; 7.5 jours).

Modèles globaux vs aire limitée (2/2)

Sur domaine restreint (ex France), permettent un maillage plus fin, on ne néglige plus $\frac{dw}{dt}$: meilleure prévision des orages, thermiques (donc brises), ondes...

Nécessite un couplage aux bords avec modèle global...
→ effets de bords !

Modèles à aire limitée (non hydrostatique)

- Chez MF : AROME (1.3km/50s; 48h) couplé à ARPEGE, moins connu mais utile : [AROME-IFS](#) couplé à ECMWF (2.5km/50s ; 51h) visible sur Meteociel.
- Modèle Allemand : ICON D2 (2.2km/60s; 48h) pour les Alpes (mais pas les Pyrénées !)
- Météoparapente utilise WRF : modèle open source utilisé avec une surcouche "RASP" du Dr Jack (2.5 à 7.5km/?; 5 jours)
- Meteoblue utilise NEMS (4km/?; 3 jours) + autres modèles...



Limites des modèles : chaos

Lu sur le discord Profil

”Bonsoir, je ne comprends pas bien pourquoi les modèles météo ne s'accordent pas dans un futur si proche. Comment une si grande compétence en matière d'ingénierie météorologique aussi importante parmi nos techniciens donnent des modèles si différents en si peu de temps !”

- Deux sources d'erreurs dans la PNT : **Erreurs de modélisations** et **erreurs dues à la discréétisation** et résolution numérique.
- Mais même si l'on ne faisait pas d'erreurs, Atmosphère = Système **chaotique** : une infime différence sur la condition initiale peut produire des simulations **très** différentes : "effet papillon", **le pendule double**.
- Même modèle déterministe peut devenir **imprévisible** au-delà d'un certain horizon temporel (meteo : qqs jours à 2 semaines).
- Anecdote à MF avec changement de supercalculateur...

Situations + ou - chaotiques ? (1/2)



Figure: Exemple de simulation d'une bille sur un parcours 2D

En météo :

gros anticyclone centré sur la France ; goutte froide qui circule sur proche Atlantique.

Situation + ou - chaotique ? (2/2)

Certaines situations météos sont connues pour être chaotiques (goutte froide, orages l'été, marais barométrique, cyclones tropicaux....), mais parfois on ne sait pas trop...

On peut comparer les **différents modèles** (Windy, Meteoblue propose des comparaison de modèles) ou **différents runs** d'un même modèle.

Prévision d'ensemble et indice de confiance

- On lance plusieurs fois le même modèle en changeant légèrement les conditions initiales (on perturbe pression, température, humidité, vent)
- On mesure les écarts en sortie des modèles (entre les membres),
- S'il y a une grande dispersion, l'indice de confiance est faible (1/5), sinon il est fort (5/5).

Exemple : PE-AROME sur Meteociel.

Prévision et Intelligence Artificielle(1/2)

IA pure

- Entraînement sur **réanalyses** (ERA5 du CEP disponible de 1940 à aujourd'hui, maille de 31km et pas de temps d'1h).
- L'IA apprend à passer de 1 (ou plusieurs successives à 6h d'intervalles) réanalyse(s) à la suivante 6h après.
- On lui donne 1 (ou plusieurs) champs de données obtenues par assimilation à t_0 et l'IA ressort $t_0 + 6h$, $t_0 + 12h$, etc...
- Avantages : Très **léger et rapide**, tourne sur un PC perso !
- Inconvénients :
 - IA ne respectent pas lois de conservations de base...
 - Peu d'entraînement sur phénomènes rares ou extrêmes ...
 - Difficulté à prévoir phénomènes nouveaux (changement clim),
 - Une maille grossière du même ordre que réanalyses (mais possible d'améliorer par **downscaling**...)
 - Peu de données publiques (souvent boîtes privées : Nvidia, Huawei, Google... seul **AIFS** du CEP est public).

Prévision et Intelligence Artificielle(2/2)

Une autre façon d'utiliser l'IA :

Post traitement

- Entraînement en comparant des sorties modèles du passé avec des réanalyses : apprend les biais du modèle en question.
- On lui donne une sortie modèle et il corrige automatiquement les biais.
- Avantages : Fait le boulot d'un prévisionniste expérimenté : débiaiser le modèle. Mais coûte moins cher.
- Inconvénient : Nécessite modèle classique gourmand en calcul.
- -Chez MF : Adaptation statistique appliquée à ARPEGE ET AROME,
- Chez DWD : DL-MOS" (Deep Learning Model Output Statistics) appliquée à ICON,
- à la NOAA : ML-MOS" (Machine Learning) appliquée au GFS.



En pratique : que livrent les modèles ?

- Des valeurs pour chaque point de grille et chaque pas de temps : vent, température, pression, humidité, précipitations...
- Ces données des centres météo nationaux sont publiques, accessibles via API,
- on peut les visualiser sur des cartes, voir des profils verticaux en certains points (très utiles pour le parapente et voir la hauteur de la couche convective) : Windy, Meteociel, Meteoblue, velivole, wetter.aero... proposent des visualisations plus ou moins belles de ces sorties modèles.

Comment faire une bonne prévi (1/2)

- Faire une **descente d'échelle** : partir d'une grande échelle (synoptique) zoomer petit à petit sur la zone qui nous intéresse,
- Permet de connaître les liens de causalité, d'où viennent les grands **forçages**, savoir si on est dans une situation plus ou moins chaotique...

Grande échelle : modèles globaux

- **Altitude** (ZT 500hPa pour dorsales, thalweg, gouttes froides, flux d'altitude),
- **Basse couche** (θ'_w 850 hPa et Pmer pour anticyclones, dépressions, fronts).

Comment faire une bonne prévi (2/2)

échelle locale : modèles à aire limitée

- **Force et direction du vent** : au sol et en altitude.
 - **Nébulosité**.
 - **Hauteur du plafond** : lié à la convection et à l'humidité.
 - **Risque d'orage** : déterminé par l'instabilité et la dynamique.
 - **Brises de vallée** : mieux modélisée par AROME, mais le mieux reste de se renseigner avec les pilotes locaux !
-
- Ne pas se fier à un seul modèle si possible...
 - Exemple avec mon site internet :
<http://samygallego.chez.com/meteo/>