

An aerial photograph of a town, likely Paris, is shown from a high angle. The town is surrounded by a thick layer of white clouds. Overlaid on the bottom left of the image is a white weather map with contour lines and numerical values such as 1010, 1015, 1020, 1025, 1030, 1035, 1040, and 1045. The background of the slide is a solid dark blue color.

Météo et Innovation : une évolution permanente

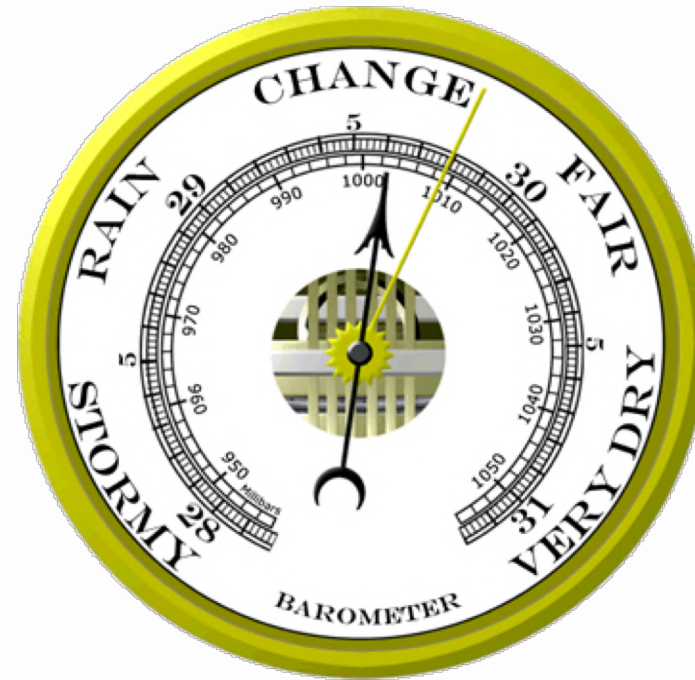
Paris, le 4 juillet 2019

*Marc Pontaud
Directeur de la Recherche
de Météo-France*



**METEO
FRANCE**

Quel temps demain ?



Naissance d'un réseau d'observation

Le 14 novembre 1854, une terrible tempête, survenant sans la moindre alerte lors de la [guerre de Crimée](#), traverse l'Europe d'ouest en est, causant la perte de 41 navires dans la [Mer Noire](#).

A la demande de [Napoléon III](#), Le Verrier met en place un réseau d'observatoires météorologiques sur le territoire français, destiné avant tout aux marins afin de les prévenir de l'arrivée des tempêtes.

Ce réseau regroupe 24 stations dont 13 reliées **par télégraphe**, puis s'étendra à 59 observatoires répartis sur l'ensemble de l'Europe en 1865.

Dès 1863, la première prévision météorologique (prévision à 24 heures grâce à des cartes et bulletins météorologiques quotidiens) destinée au port de Hambourg est réalisée.

Principes et équations

Equation du mouvement

Newton (1642-1727)

Euler (1707-1783),

Saint-Venant (1797-1886),

Navier (1785-1836) & Stokes (1819-1903)

Coriolis (1792-1843)

⇒ **Evolution d'évolution temporelle du vent (u, v, w)** qui dépend de la pression (P), de la masse volumique (ρ), sous l'effet de la gravité et de la rotation de la Terre

Equation de la conservation de la masse

⇒ **Equation d'évolution temporelle de la masse volumique (ρ)** qui dépend de ρ , u, v et w .

Equation de la température

Premier Principe de la Thermodynamique : (un long processus) Meyer (1845), Clausius (1850), Rankin (1850), ...

⇒ **Equation d'évolution temporelle de la Temperature (T)** qui dépend de u, v, w , P et ρ

Equation d'Etat

Hypothèse des Gaz Parfaits ⇒ **Relation diagnostique** entre P , T et ρ

Equations fondamentales de l'atmosphère

A la fin du 19^{ième} siècle :

- 6 équations (5 prognostiques et 1 diagnostique)
- 6 variables : u, v, w, P, T, ρ

Le problème est bien posé (*au sens mathématique*) mais aucune solution analytique n'a été trouvée ...

et des « processus » sont manquants :

- le rayonnement (solaire et infra-rouge)
- l'eau dans l'atmosphère : la vapeur d'eau, les nuages, la pluie
- et d'autres que nous verrons plus loin,

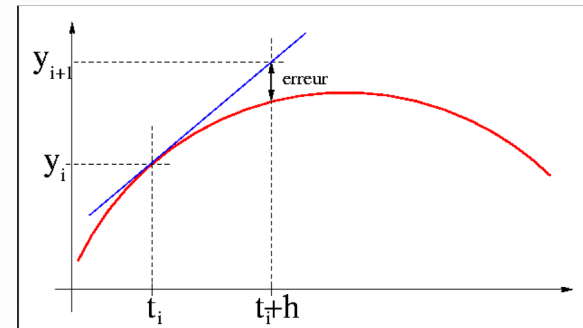
Le "problème" se sépare en 2 parties: « **dynamique** » et « **physique** »

Début du 20ième siècle

L'impasse analytique : la voie numérique

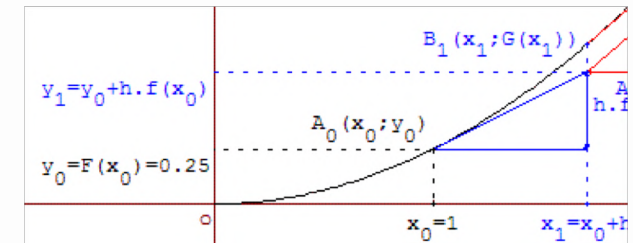
Prof. C. Abbe, 1901 : *The physical basis of long-range weather forecasts*,
Mon. Weather Rev. 29, 551-561

Les variations instantanées calculées à un instant précis sont maintenues « constante » sur un intervalle de temps



V. Bjerkness (1862-1951) : un processus en 2 étapes :

1. Un état initial à partir des observations
2. Extrapolation de l'état futur à partir de cet état initial avec les équations discrétisées



L.F. Richardson (1881-1953) :

Première résolution numérique (1922) : **+145 hPa en 6 heures !!!**

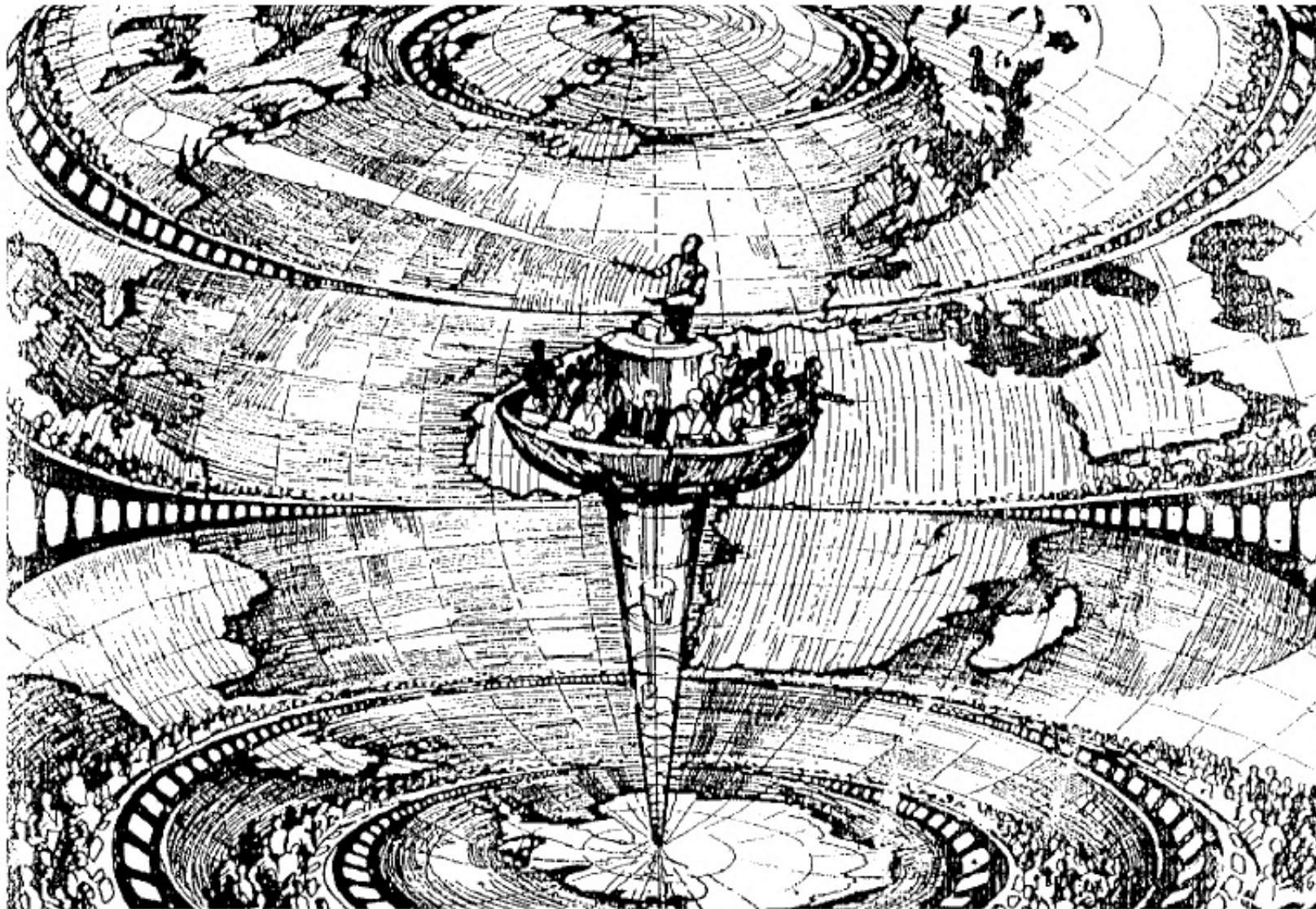
Il imagine :

- ⇒ problème dans l'état initial
- ⇒ problème dans la résolution numérique

et il imagine ...

Début du 20ième siècle

Le super-calculateur humain de Richardson



Début du 20ième siècle une situation peu prometteuse

Des équations qu'on ne sait pas résoudre et dont on ne sait pas ce qu'elles représentent comme processus physiques

Des équations qu'on imagine résoudre numériquement, mais :

- sans méthode numérique
- et sans moyen de calcul

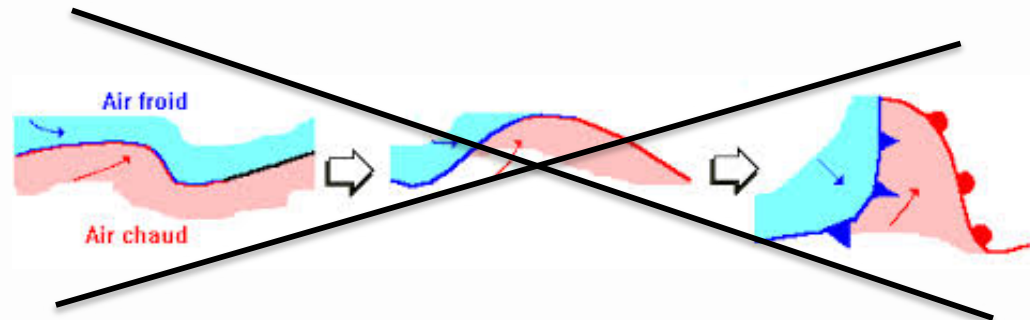
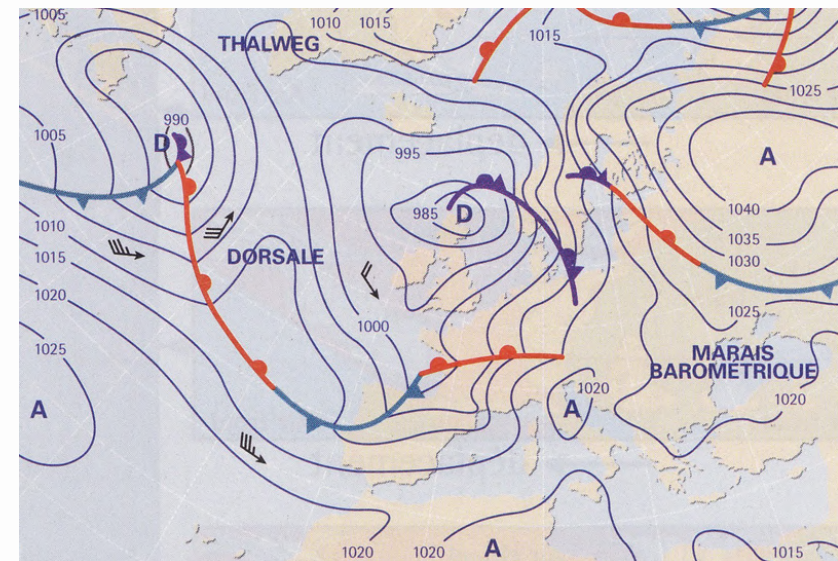
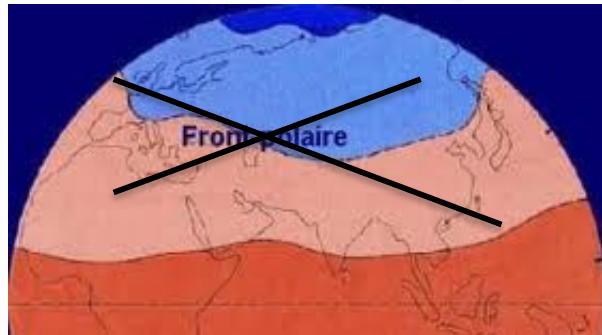
Pas suffisamment d'observation pour construire les conditions initiales

1920 - 1940

COMPRENDRE AVEC LES OBSERVATIONS :

Bjerknes et Solberg (1922)

~~« POLAR FRONT »~~

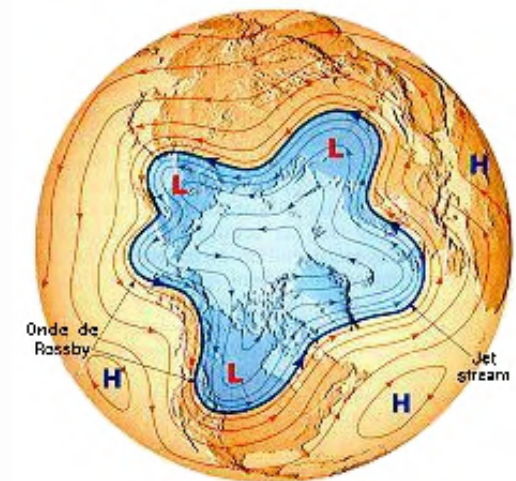
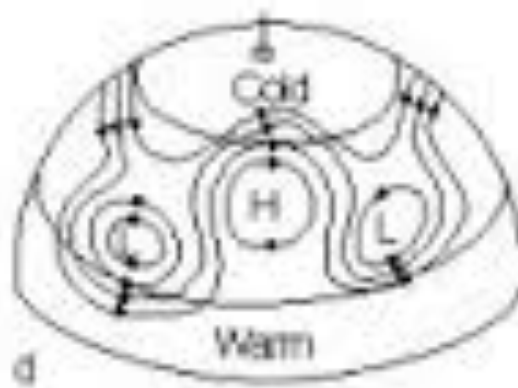
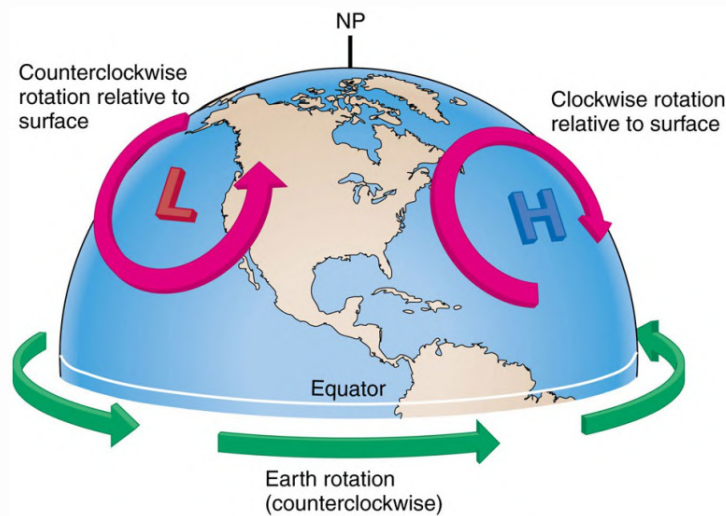


1920 - 1940

COMPRENDRE AVEC DES EQUATIONS SIMPLIFIEES:

- > simplifier les équations avec un sens physique
- > linéariser
- > résoudre

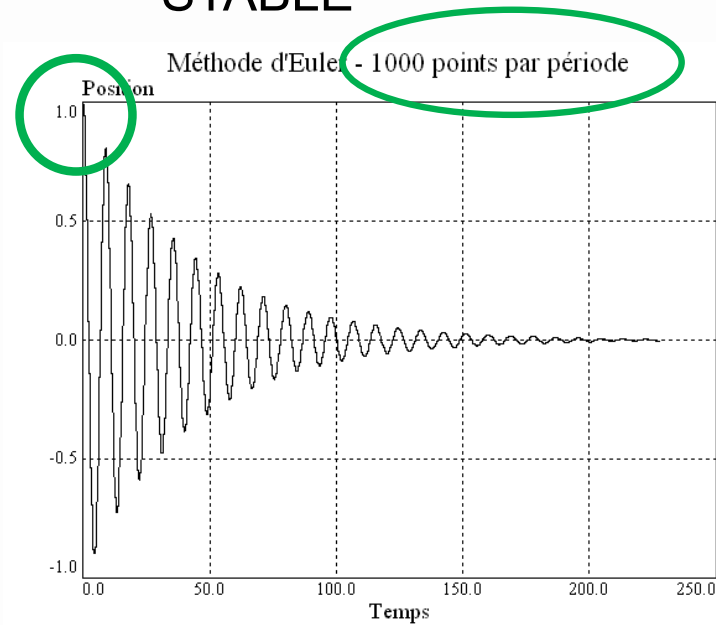
⇒ Rossby, C.-G. (1939). "Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action". *Journal of Marine Research* 2: 38



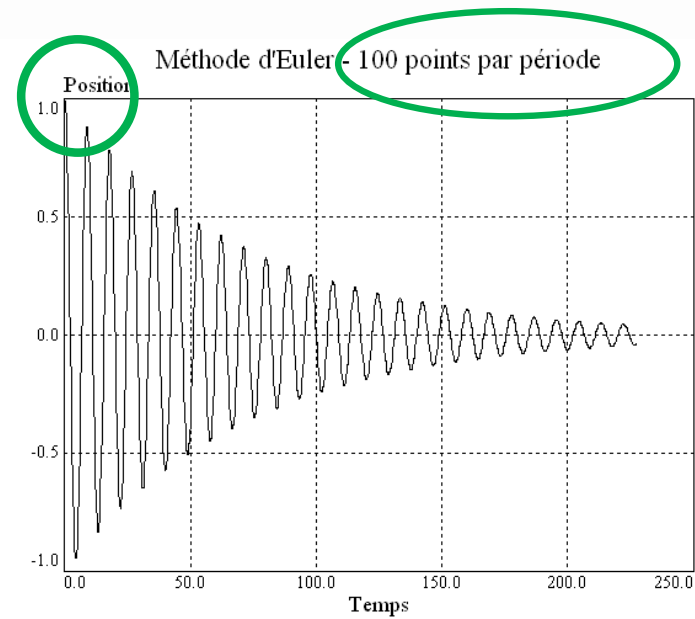
1920 - 1940

COMPRENDRE LA RESOLUTION NUMERIQUE : Courant-Fiedrichs-Lewy (1928) : le critère CFL

STABLE



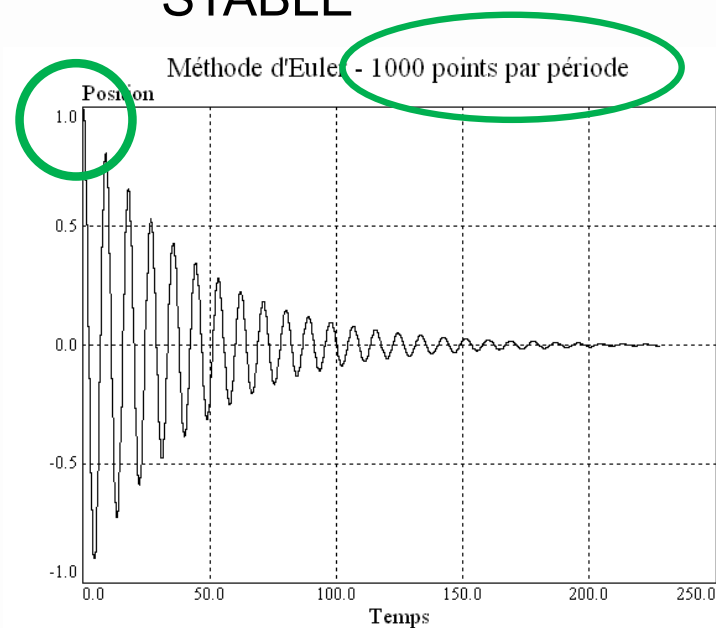
STABLE



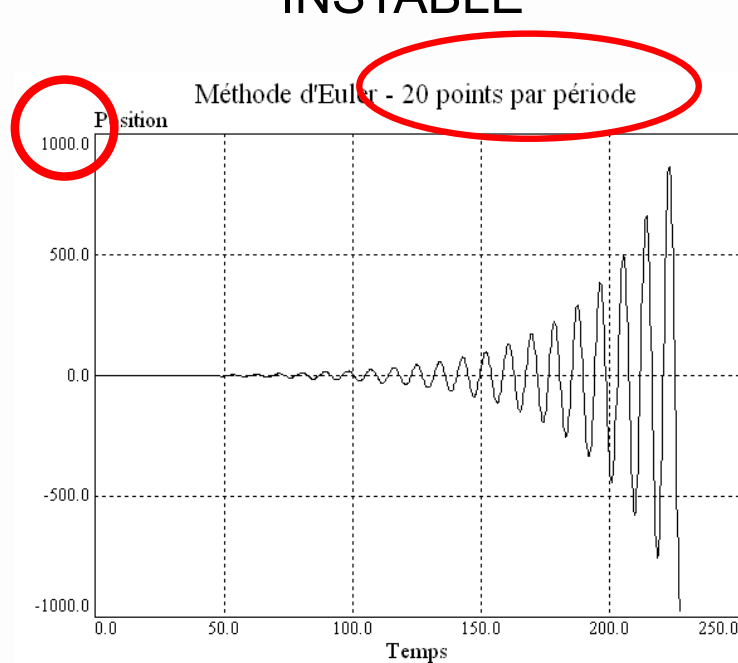
1920 - 1940

COMPRENDRE LA RESOLUTION NUMERIQUE : Courant-Fiedrichs-Lewy (1928) : le critère CFL

STABLE



INSTABLE



1920 - 1940

A la fin des années 40 :

- l'équation de Rossby (modèle) :
 - une seule couche atmosphérique 500 hPa (5000m)
 - un seul paramètre le tourbillon $\Leftrightarrow$ pression
 - pas de température, pas de nuages, pas de pluie, pas de soleil, ...
- Une méthode pour résoudre correctement l'équation (CFL)

1920 - 1940

A la fin des années 40 :

- l'équation de Rossby (modèle) :
 - une seule couche atmosphérique 500 hPa (5000m)
 - un seul paramètre le tourbillon $\Leftrightarrow$ pression
 - pas de température, pas de nuages, pas de pluie, pas de soleil, ...
- Une méthode pour résoudre correctement l'équation (CFL)
- Mesure de la pression en altitude avec les ballons sondes $\Rightarrow$ les conditions initiales



1945 - ...

Charney, Fjortoft, Neumann, (1950)

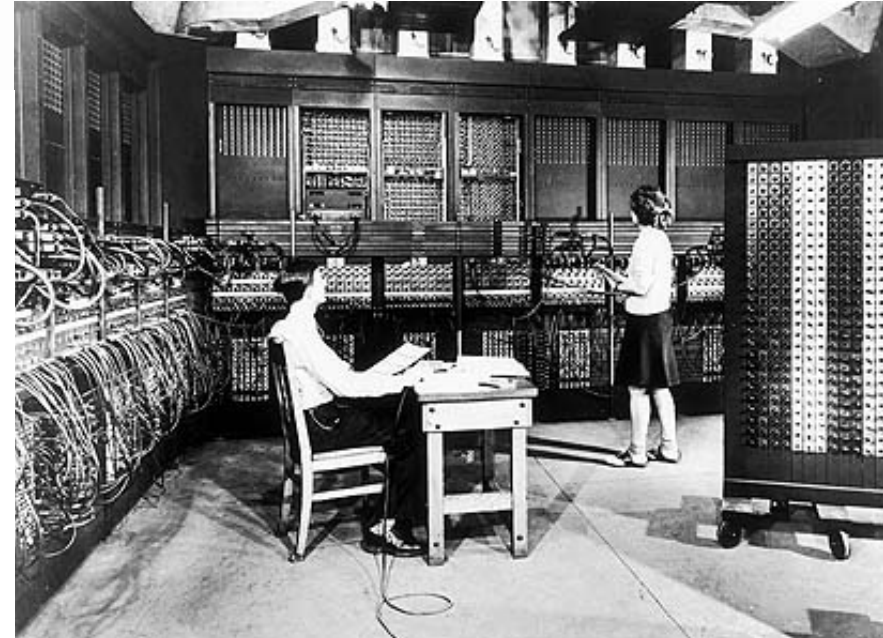
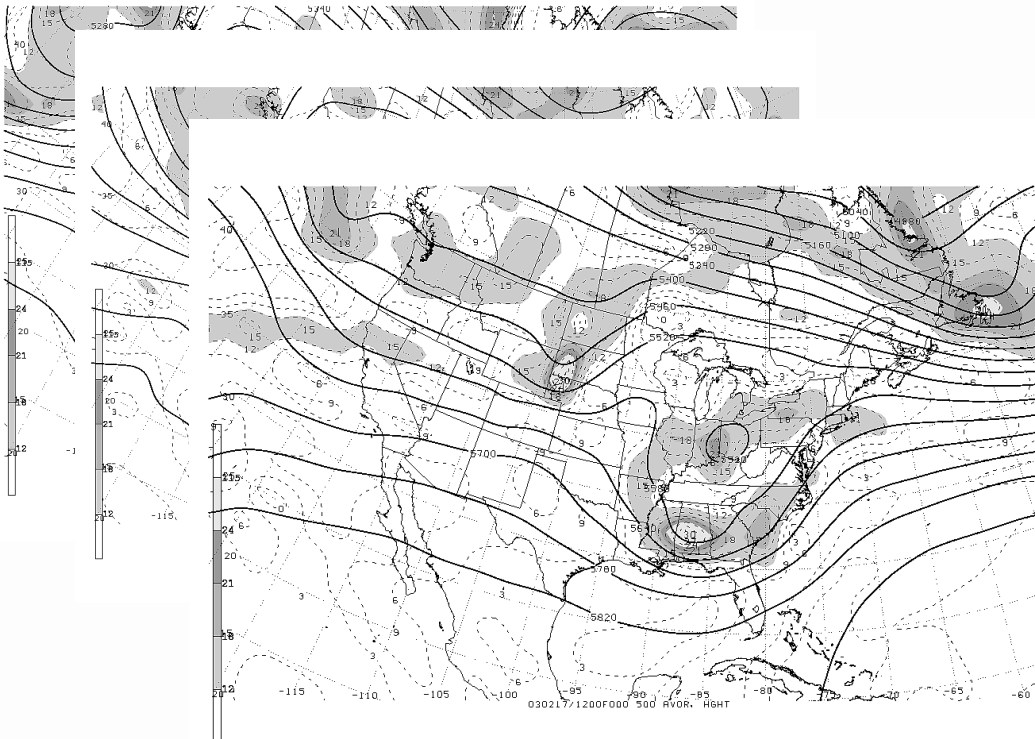
Première prévision numérique du temps avec le calculateur ENIAC

Prévision à 24h avec le modèle de Rossby

ENIAC : 5000 operations par seconde = 5 kFlops

Homme : 1 multiplication de 2 nombres à 10 chiffres = 5 minutes

Ratio: ~ 1.500.000

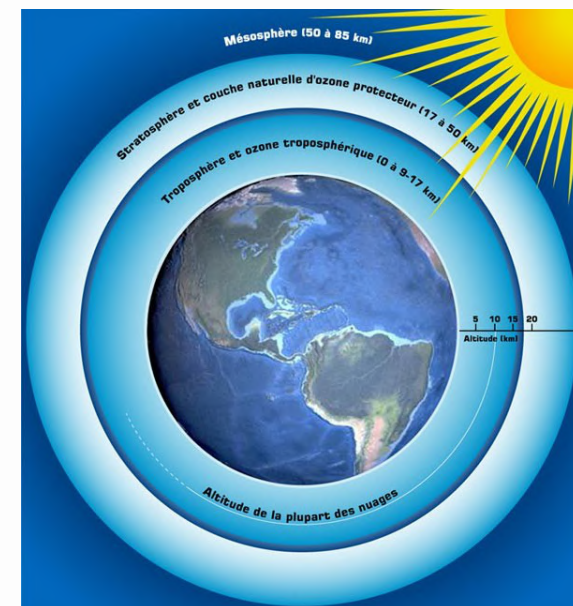
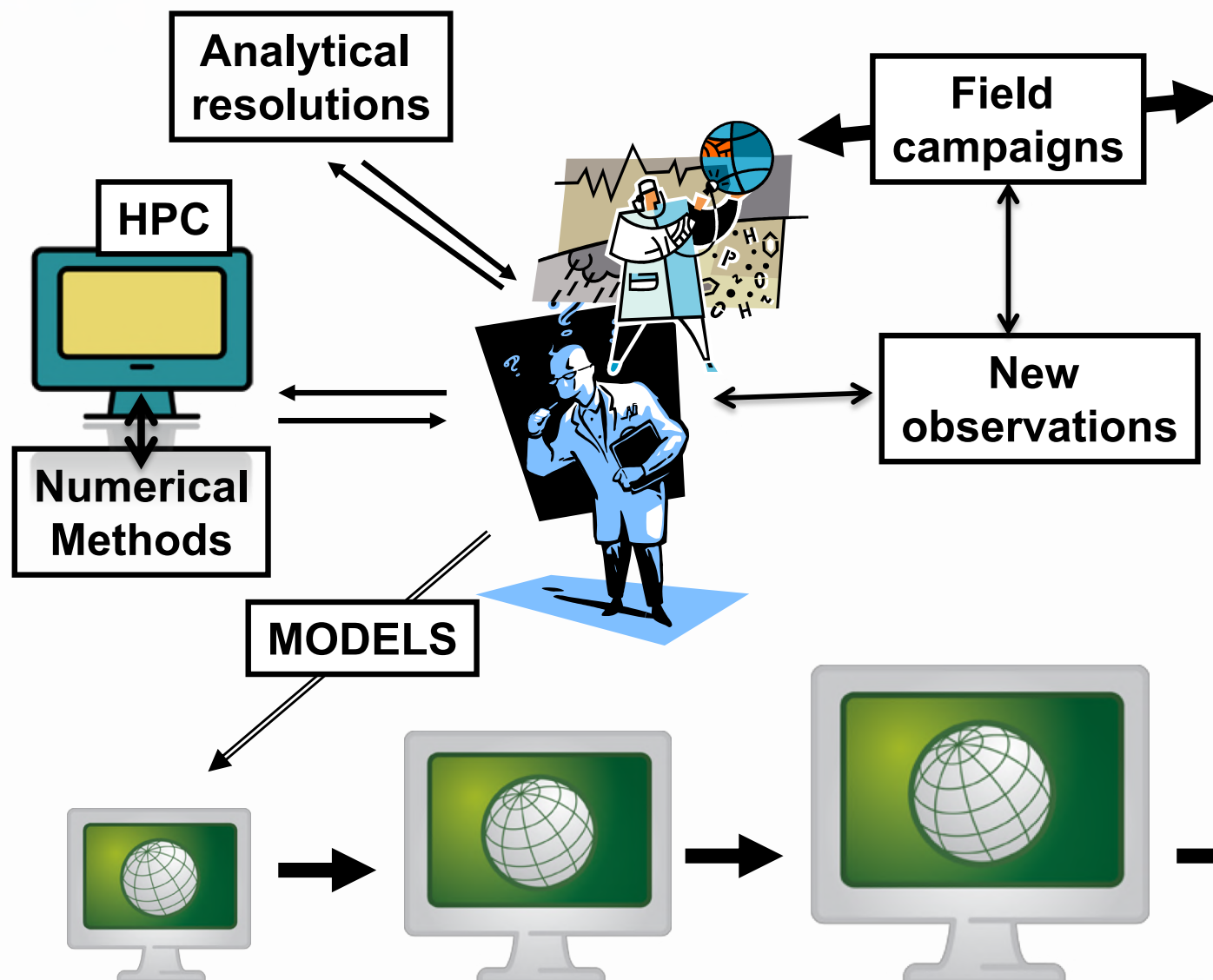


1945 - ...

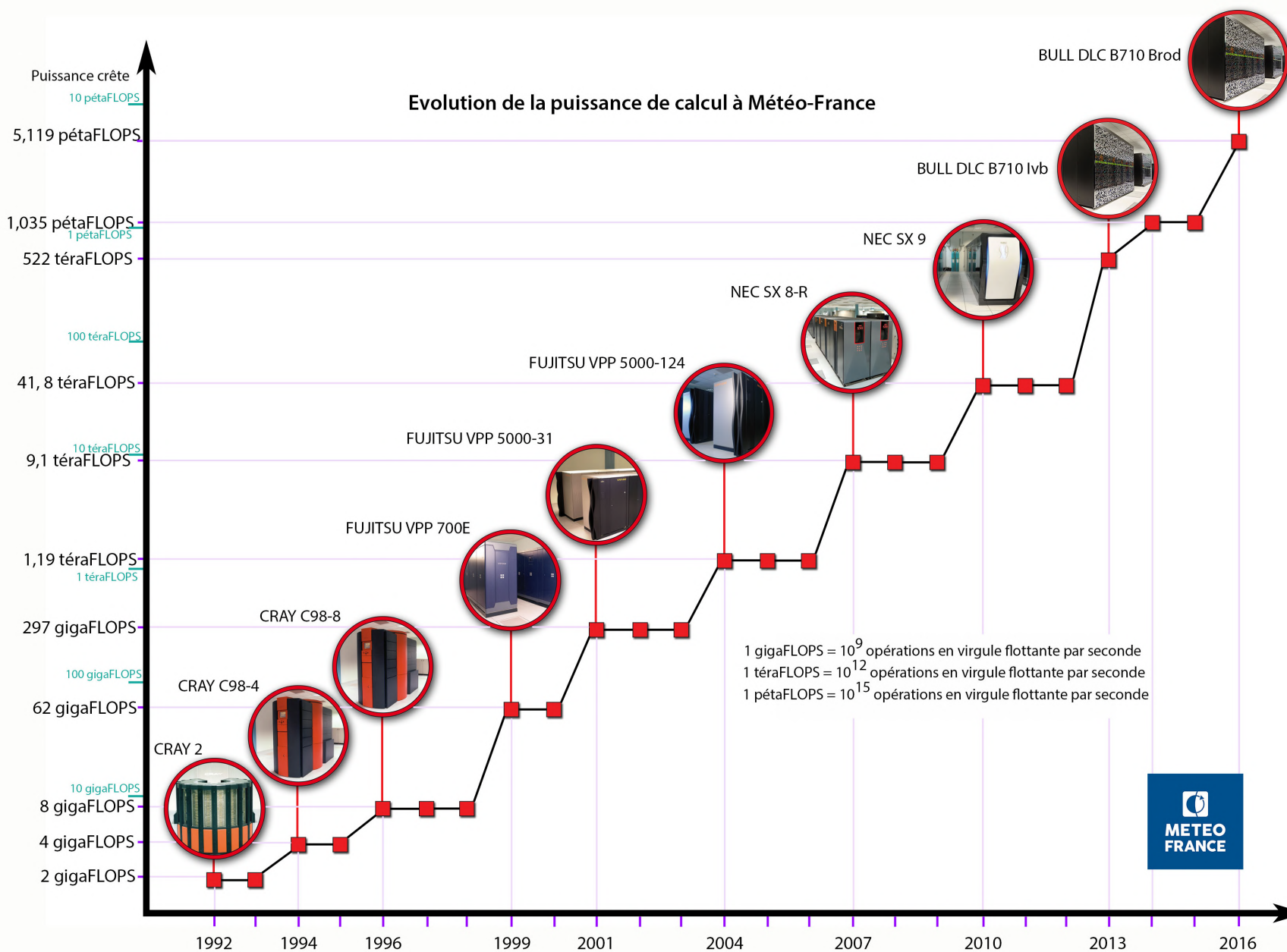
A partir de là :

- La puissance des calculateurs a augmenté
- La compréhension de l'atmosphère a progressé
- Des systèmes d'observation ont été développés
- Des progrès en mathématiques appliquées ont permis :
 - des schémas numériques plus performants
 - des approches ingénieuses pour construire l'état initial

1945 - ...



HPC Meteo-France

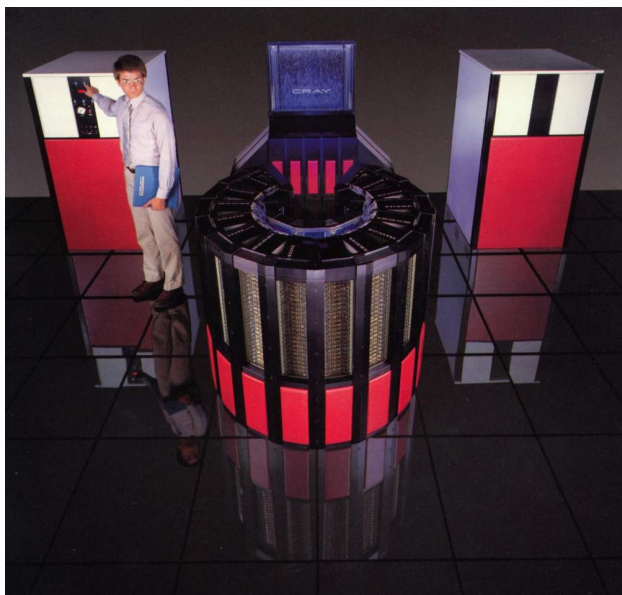


BULL B710 DLC

Bull-step 2 (2016)

2 x 2,85 Pflops

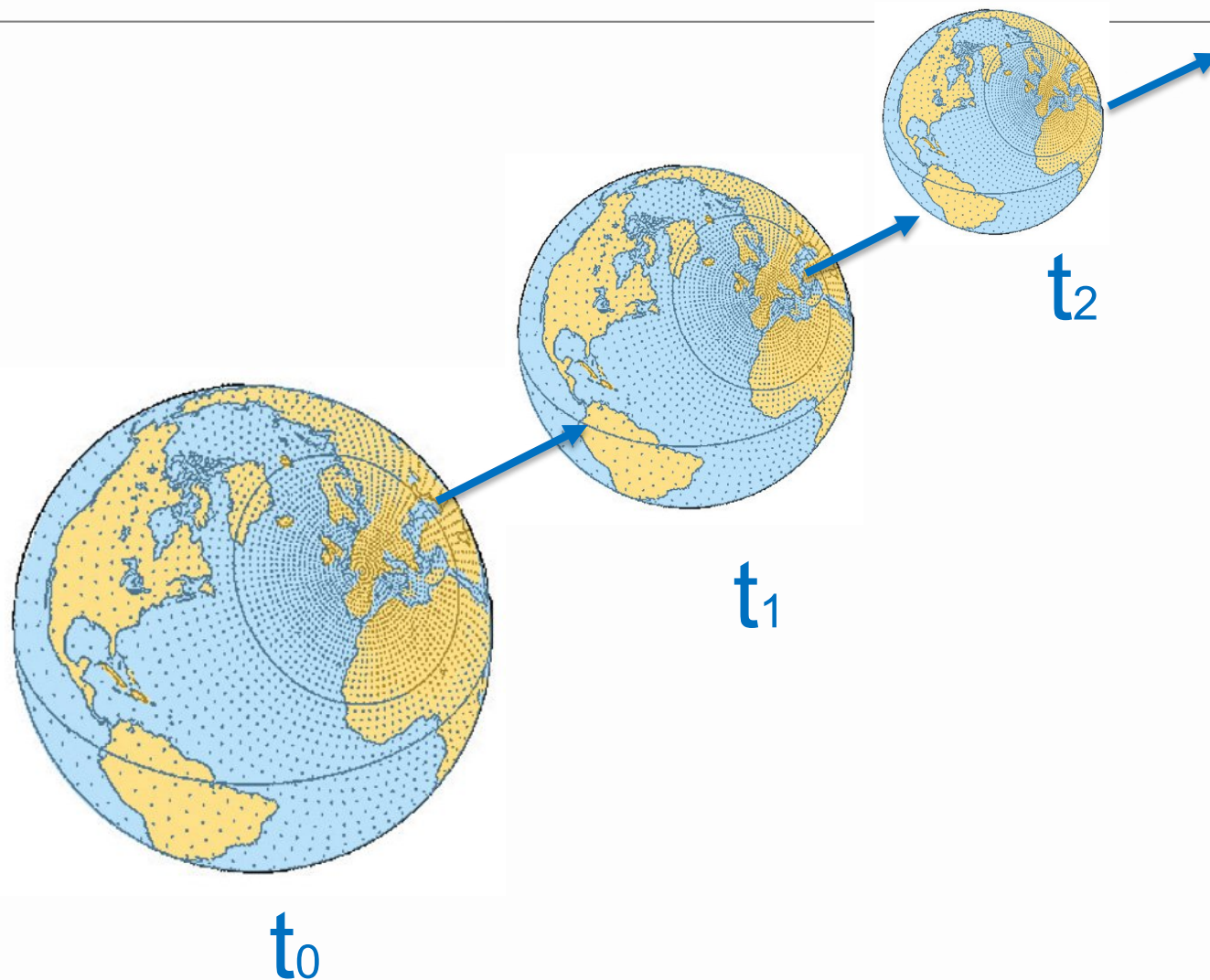
Bull-step 2 :	2 850 000 000 000 000	Flops
Bull-step 1 :	1 000 000 000 000 000	Flops
NEC SX8/9:	42 000 000 000 000	Flops
CRAY 2:	2 000 000 000	Flops
ENIAC Power :	5 000	Flops
Human « Power »:	0,003	Flops



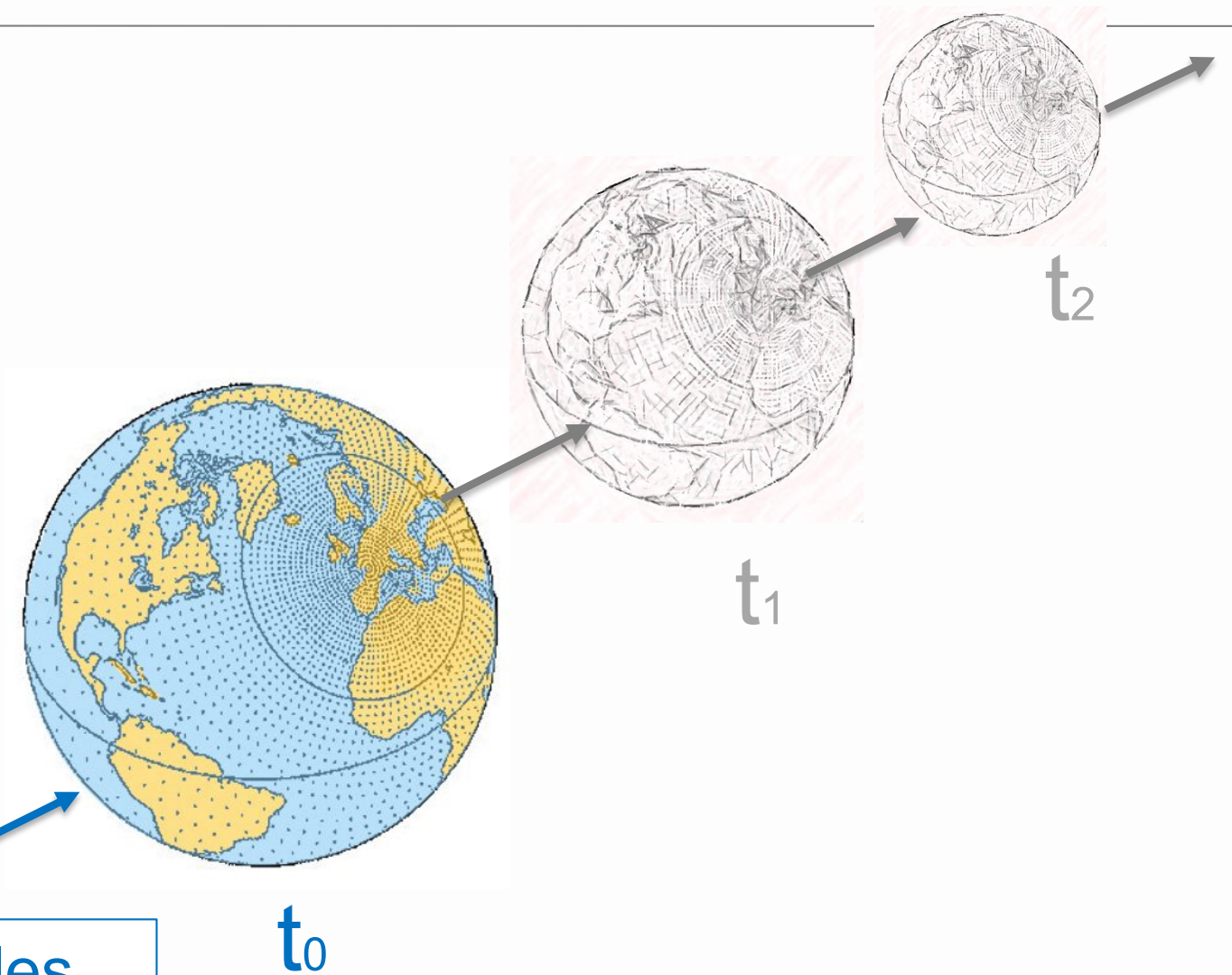


LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES

LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES

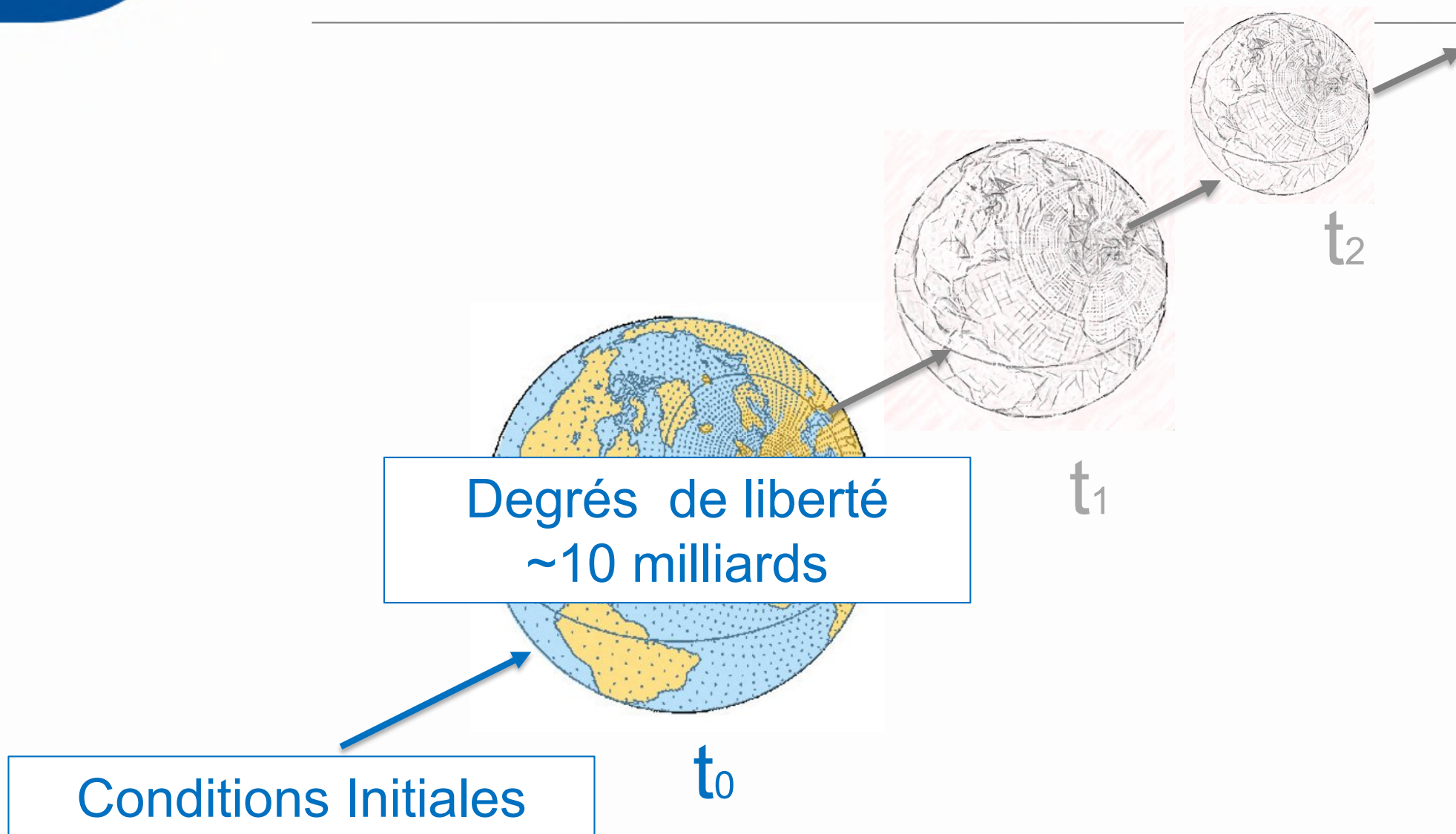


LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES

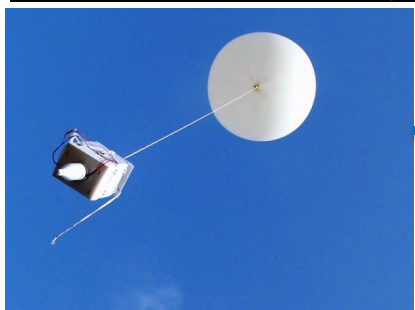


Conditions Initiales

LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



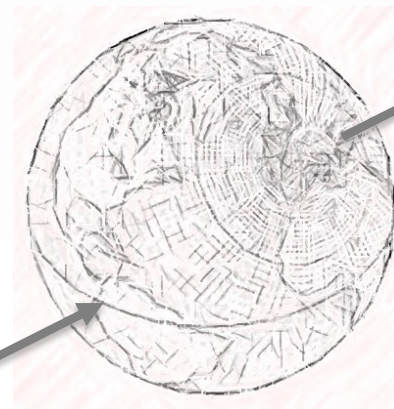
LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



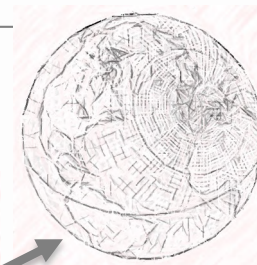
Degrés de liberté
~10 milliards



t_0



t_1



t_2

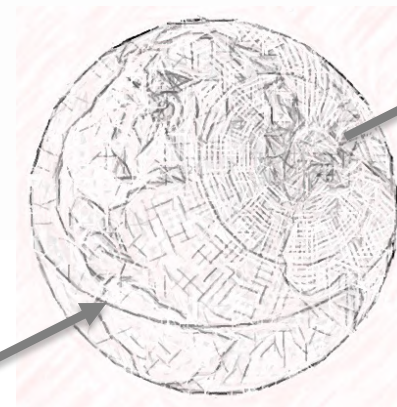
LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



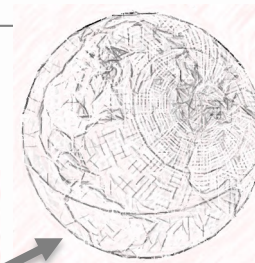
Degrés de liberté
~10 milliards



t_0



t_1



t_2

Observations disponibles :

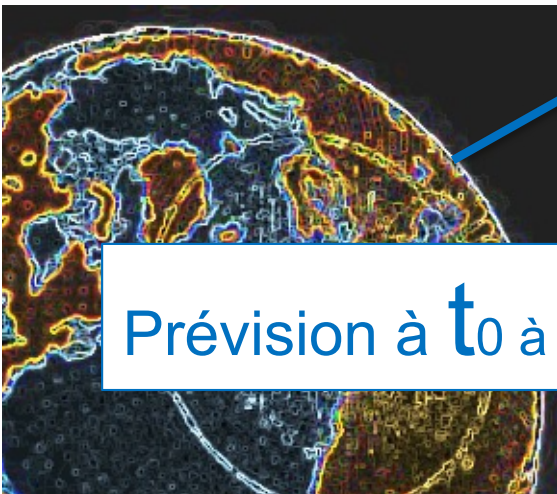
- **7.5 millions** toutes les 6 heures sur le **globe**
- **100 000** toutes les 3 heures sur **W Europe**

Les modèles manquent sévèrement d'observations

LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



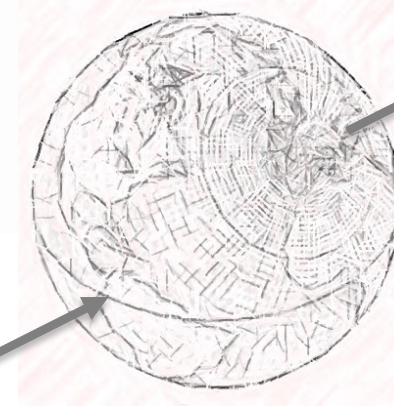
Degrés de liberté
~10 milliards



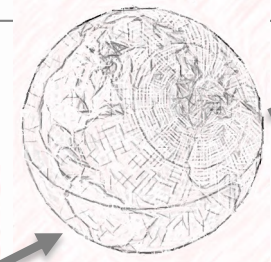
Prévision à t_0 à partir de t_{-1}



t_0



t_1



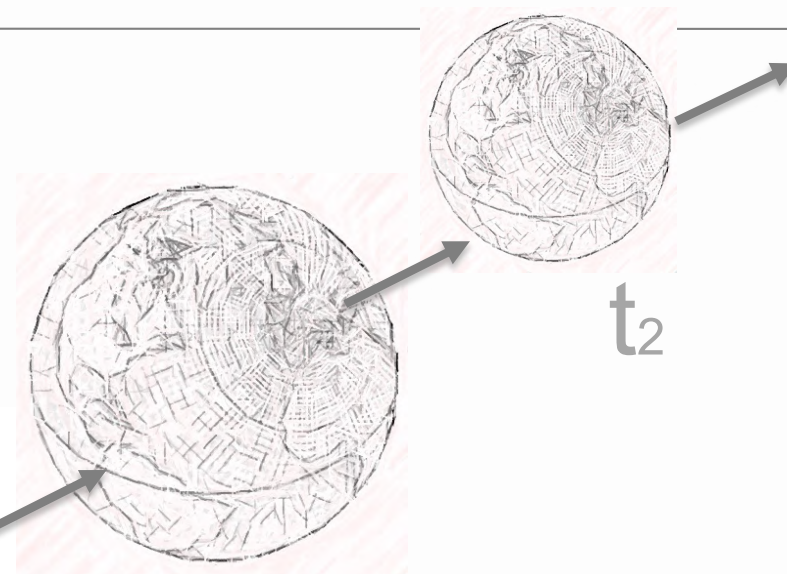
t_2

Observations disponibles :

- **7.5 millions** toutes les 6 heures sur le **globe**
- **100 000** toutes les 3 heures sur **W Europe**

Les modèles manquent sévèrement d'observations

LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



PROCESSUS
D'ASSIMILATION

t_0

Prévision à t_0 à partir de t_{-1}

Progrès théoriques

L'instabilité barocline (Charney-1947, Eady-1949) :

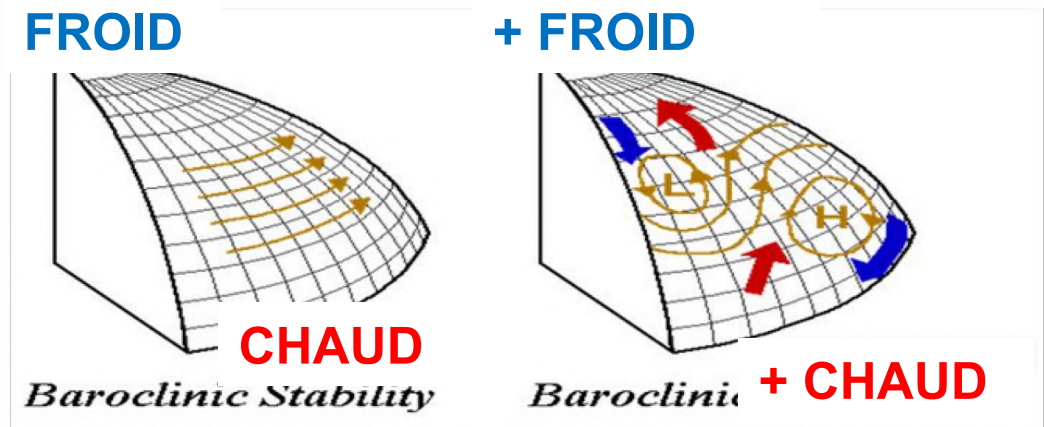
- une atmosphère à deux couches (ou plus)
- hydrostatique ($dP = -\rho \cdot g \cdot dz$) donc l'accélération verticale est nulle
 - pas d'évolution temporelle de la vitesse verticale
 - pas de nuages convectif (Cumulo-nimbus)
- le vent suit les isobares (vent géostrophique)
- dans chaque couche, une perturbation de tourbillon de type Rossby

Progrès théoriques

On applique une différence de température ΔT entre les pôles et l'équateur

Quand $\Delta T > \Delta T_{\text{crit.}}$, les perturbations des deux couches se mettent dans une position spécifique et s'amplifie => Les dépressions se creusent, les anticyclones gonflent mais de manière symétrique.

On constate alors que les perturbations transportent de la chaleur de l'équateur vers les pôles et diminuent donc la différence de température.



Ainsi, durant l'hiver, quand la différence de température entre le pôle et l'équateur dépasse un certain seuil, des perturbations se mettent en place (deviennent parfois des tempêtes) pour transporter de la chaleur des tropiques vers le pôle hivernal.

=> Modèle Quasi-geostrophique : la cyclogénèse

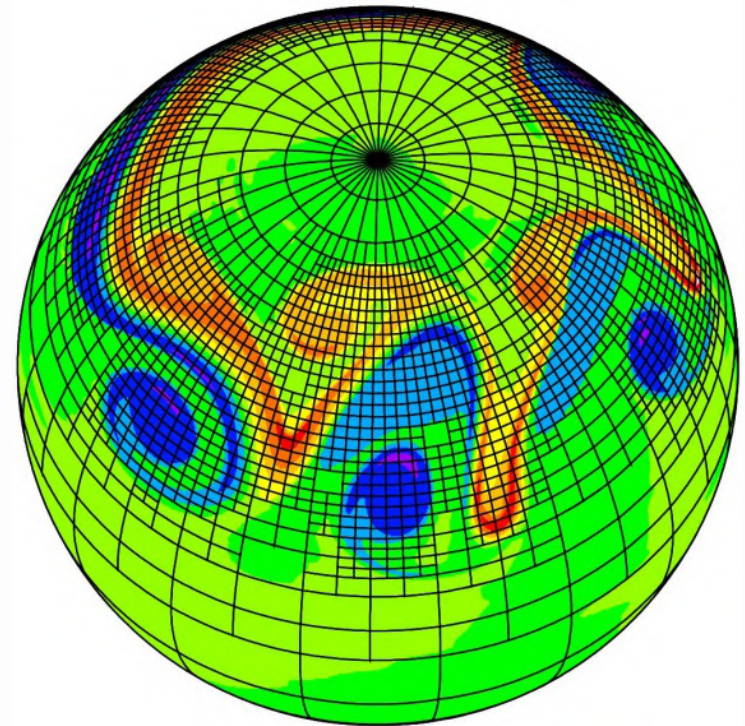
La frontogénèse semi-géostrophique

Hoskins (1978)

Même modèle que le modèle quasi-géostrophique
Mais il réussit à prendre en compte une partie du vent non-géostrophique
Et il réussit à résoudre mathématiquement ce système d'équations (!)

Il retrouve l'instabilité quasi-géostrophique
Mais avec la prise en compte du vent non-géostrophique, il obtient

- 1- un creusement plus concentré des dépressions et un étalement des anticyclones
- 2- et suivi par la formation de fronts froid et chaud



Equations Primitives (1980- ...)

Equations primitives :

U,V (vorticity, divergence), T,

Approximation hydrostatique : $dw/dt = 0$ or $dP = -\rho \cdot g \cdot dz$

⇒ cyclogénèse et frontogénèse (onde de type Rossby 10 m/s)

⇒ **Nouveau : ondes de gravités** (200 m/s)



Equations Primitives (1980 - ...)

Ondes de gravité: signal de faible amplitude mais important dans les processus atmosphériques

⇒ Difficultés :

- ⇒ Pas de temps est divisé par 20, donc il faut faire 20 fois plus de calculs
- ⇒ Nouveaux algorithmes de calcul
- ⇒ Etat initial en déséquilibre entre ondes de gravité et ondes de Rossby

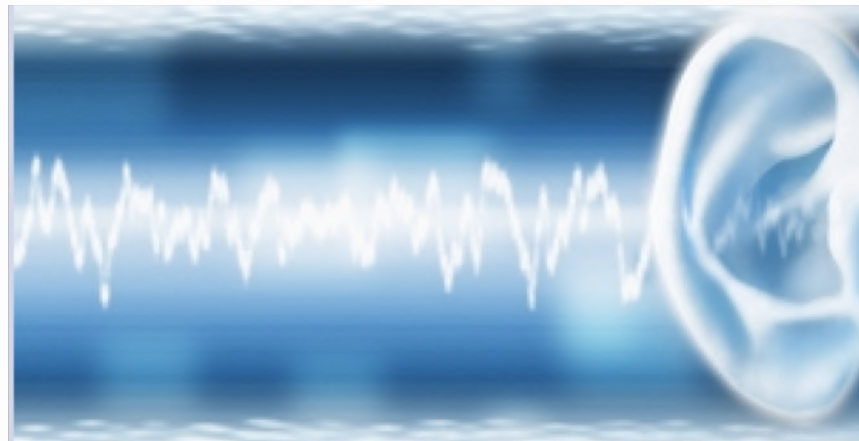
Les modèles non hydrostatiques (2008 - ...)

Les équations complètes avec **l'accélération verticale**

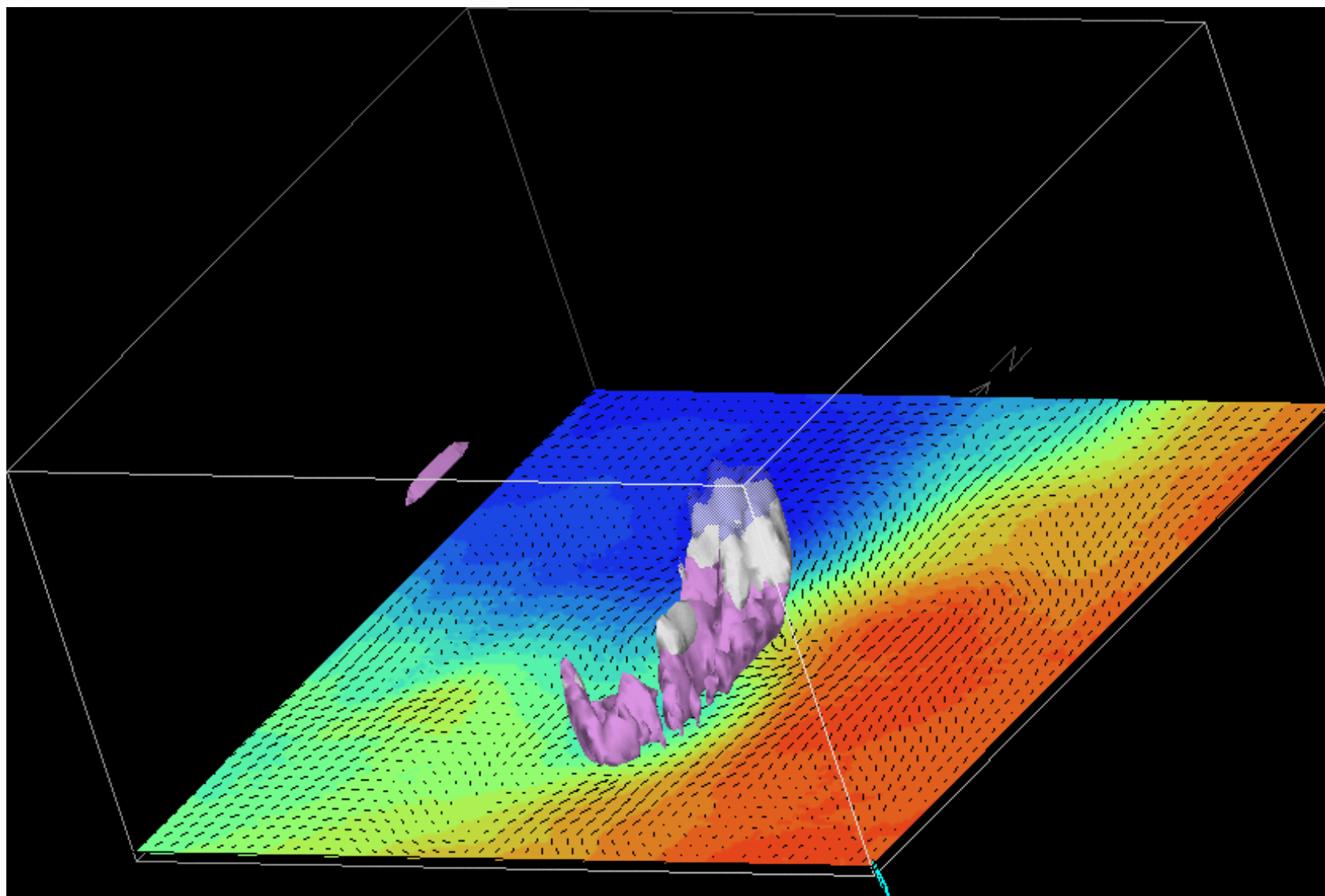
L'accélération verticale = écart à l'équilibre hydrostatique

La convection et les nuages associés sont explicitement traités.

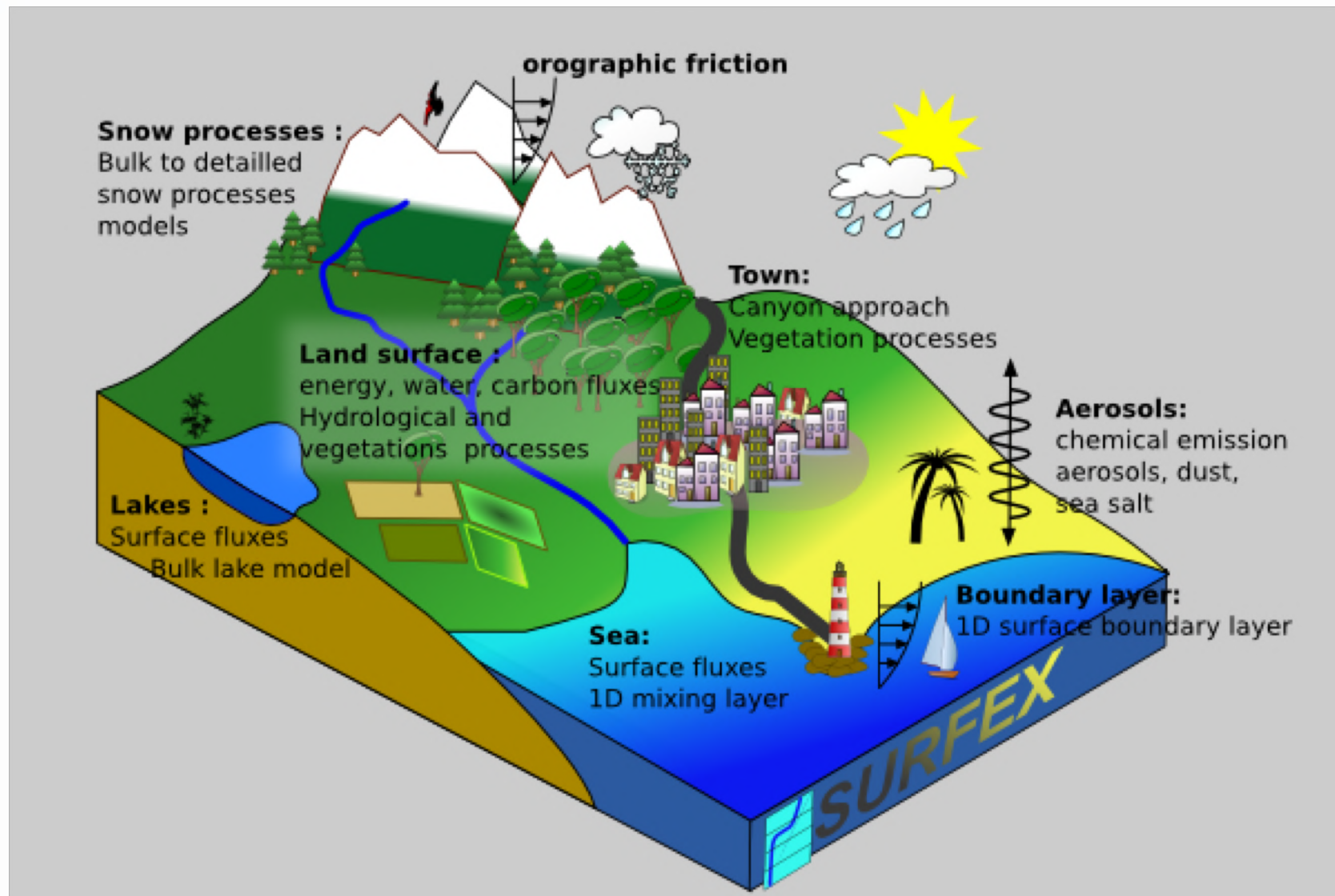
⇒ mais les ondes sonores apparaissent ... 340 m/s



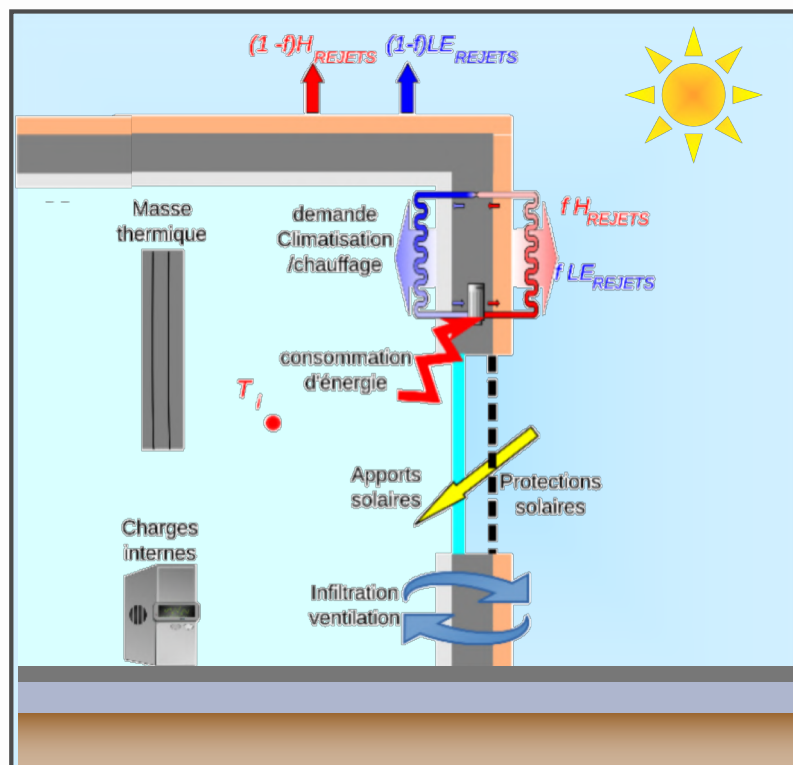
AROME : opérationnel sur l'Europe de l'Ouest depuis 2008



La physique



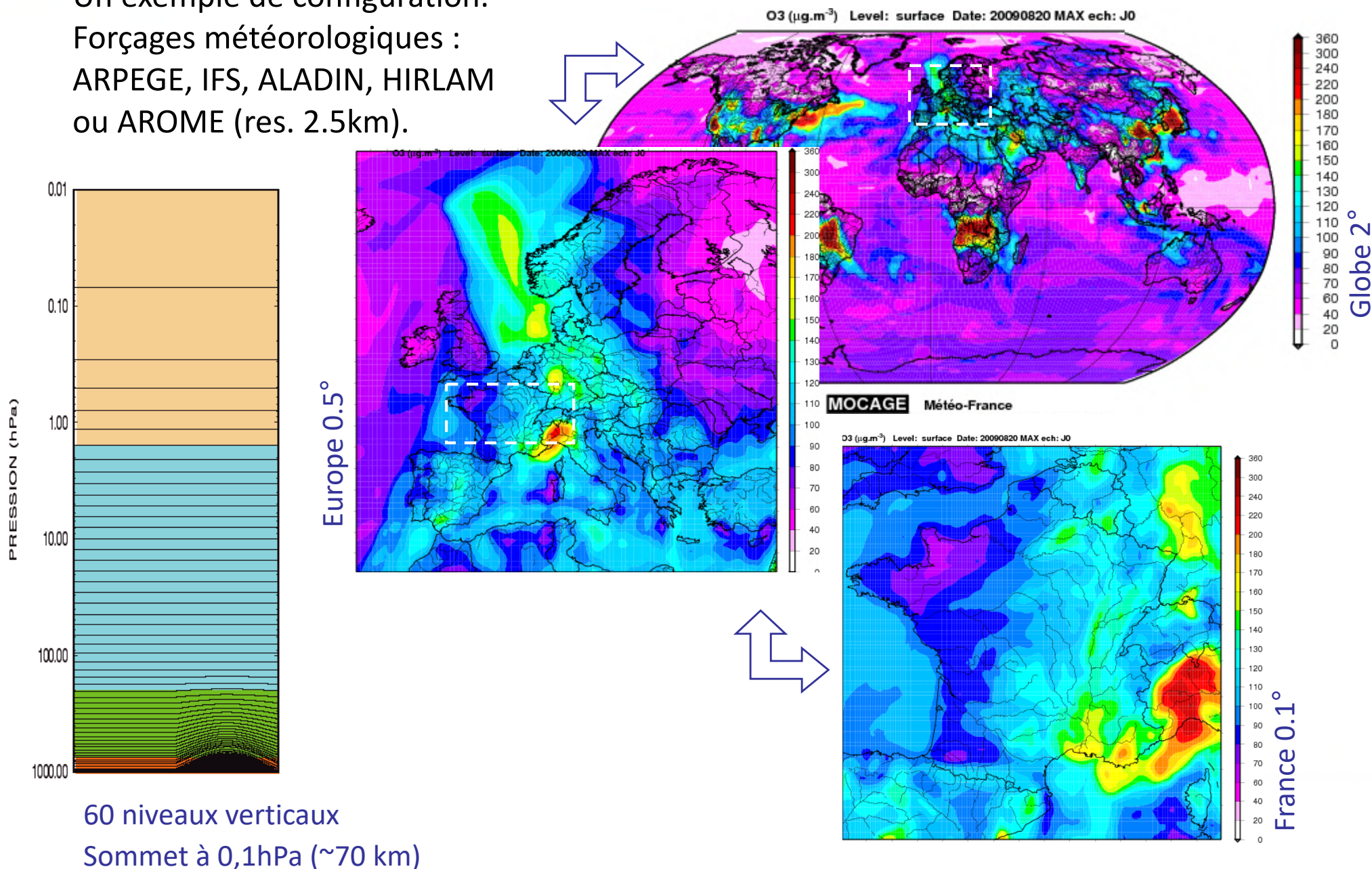
Zoom sur la ville



MOCAGE : la chimie atmosphérique à multi-échelles

Un exemple de configuration.

Forçages météorologiques :
ARPEGE, IFS, ALADIN, HIRLAM
ou AROME (res. 2.5km).

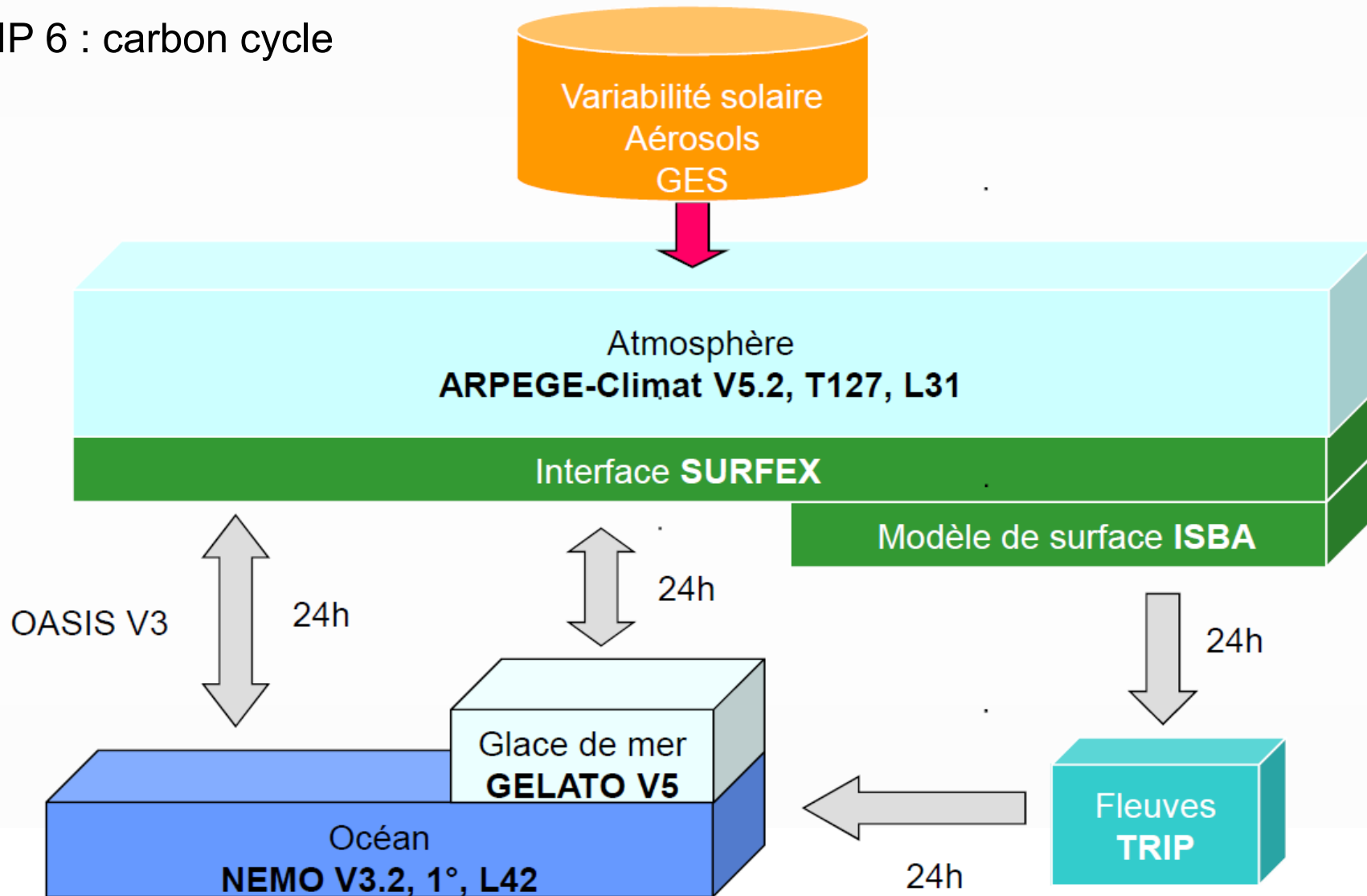


60 niveaux verticaux

Sommet à 0,1hPa (~70 km)

Modèle de système Terre

CMIP 6 : carbon cycle

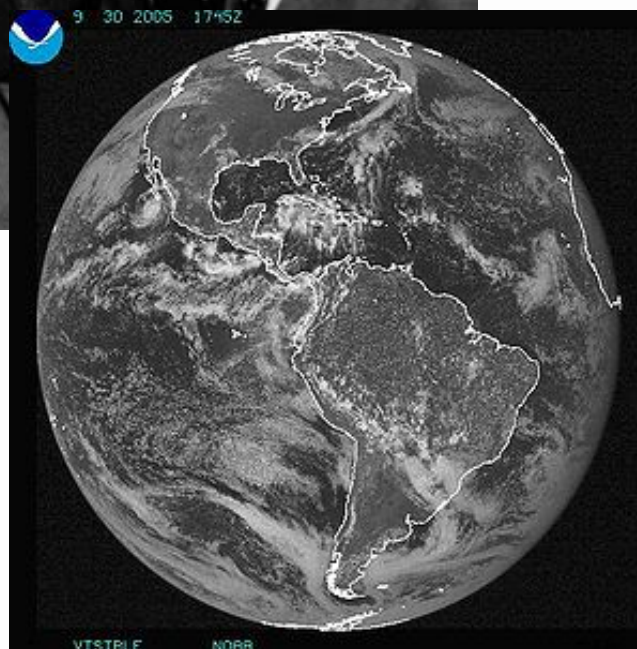


SATELLITES



Les premières images satellite
au début des années 1960

Les modèles de prévision
apprendront à les prendre en
compte dans leurs conditions
initiales



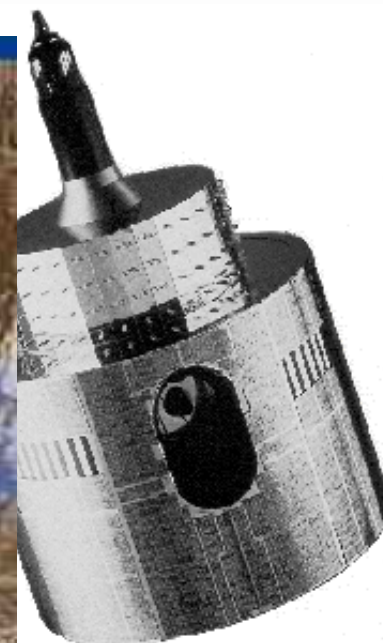
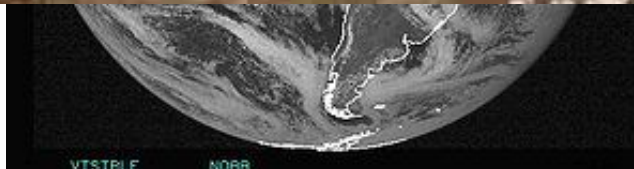
SATELLITES



Les premières images
au début des années 1960

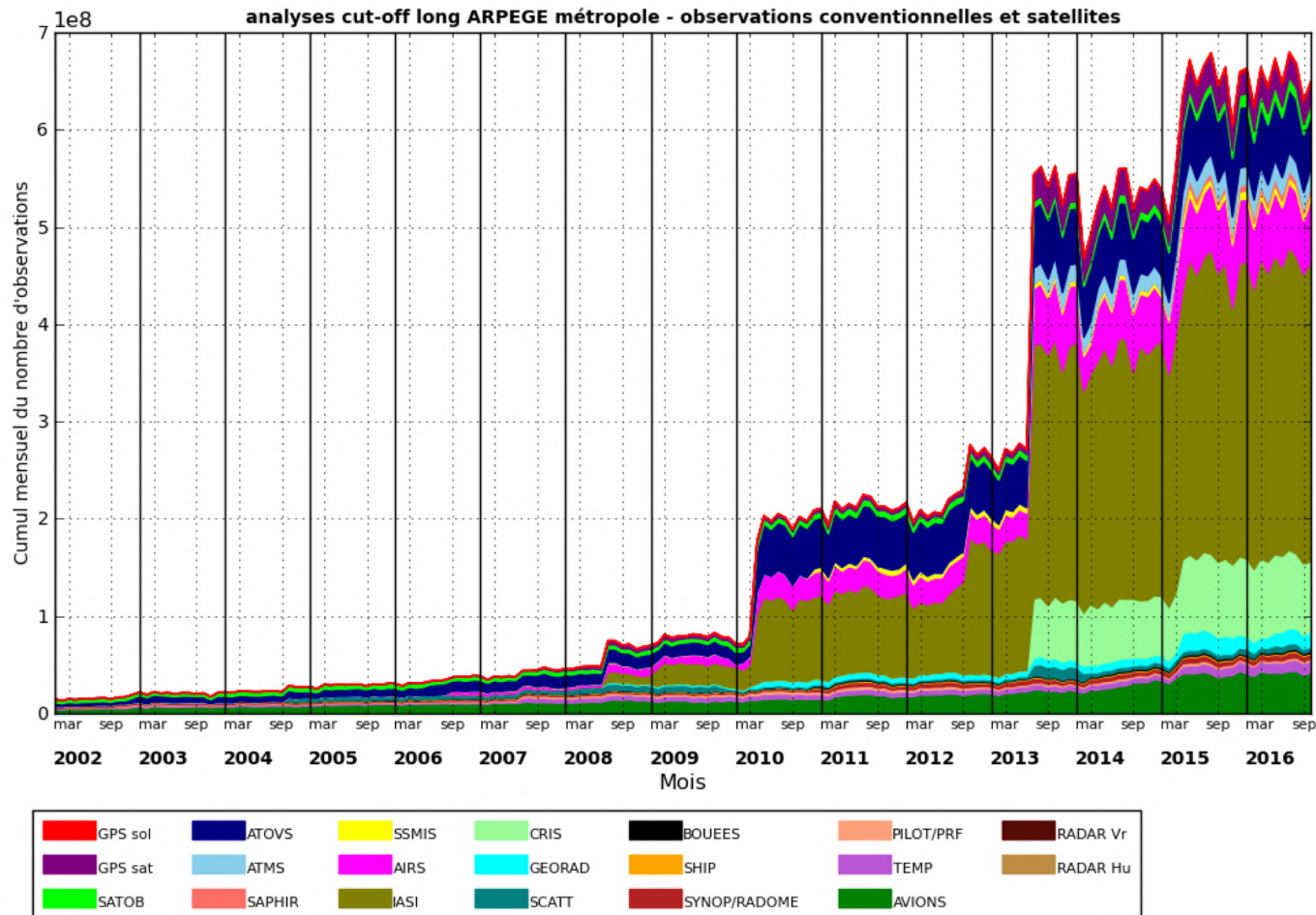


Les modèles de prévision
apprendront à les prendre en
compte dans leurs conditions
initiales



Le poids des données spatial en augmentation croissante dans la prévision numérique du temps

Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées par type d'observation



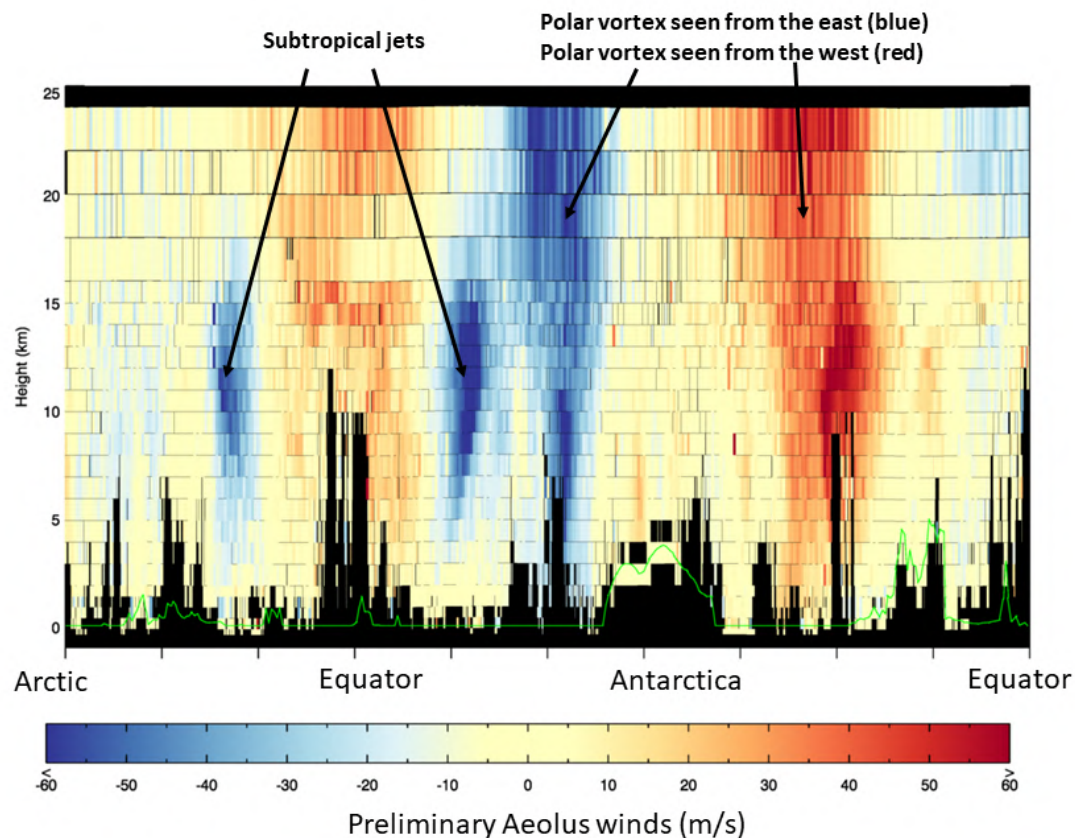
DirOP/COMPAS 02-novembre-2016

90% des données entrant dans le modèle global ARPEGE sont des données spatiales

A permanent evolution : observations

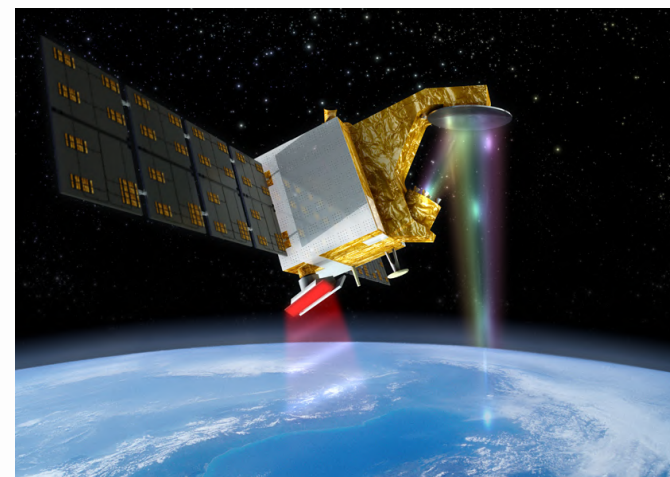
Adm-AEOLUS :
22th August 2018

- Wind
- aerosol



CFOSAT :
29th October 2018

- Sea surface wind and wave



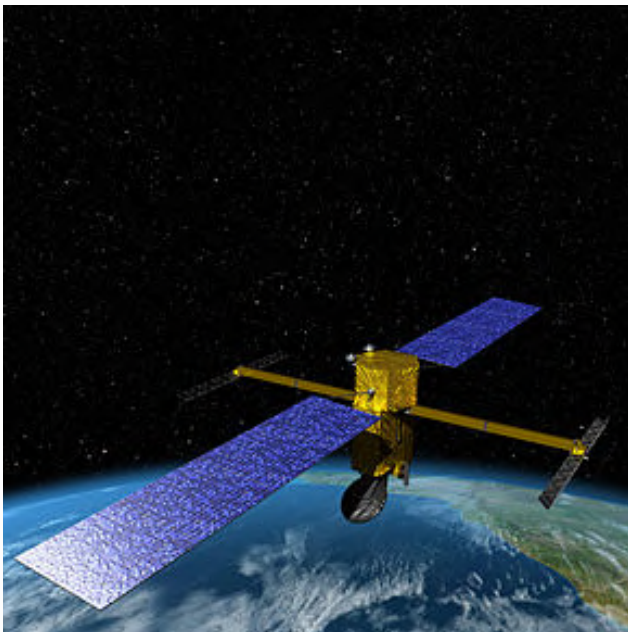
Under calibration
Data available : 3rd
december

A permanent evolution : observations

MetOp C :

7th November 2018

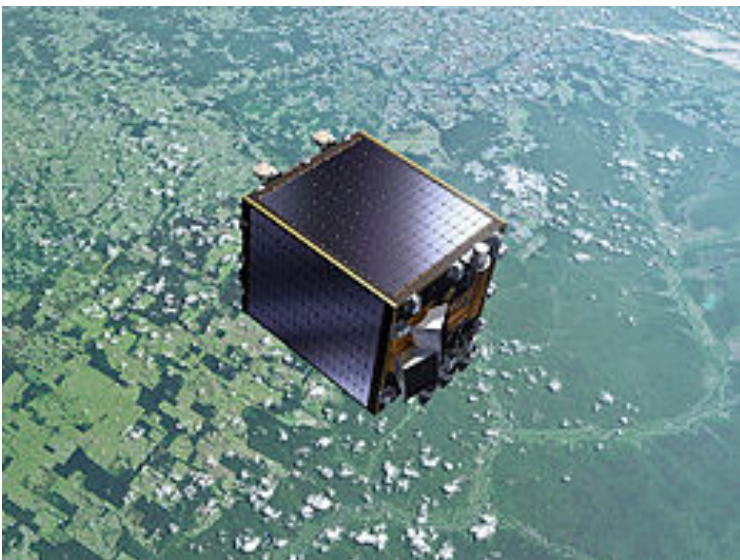
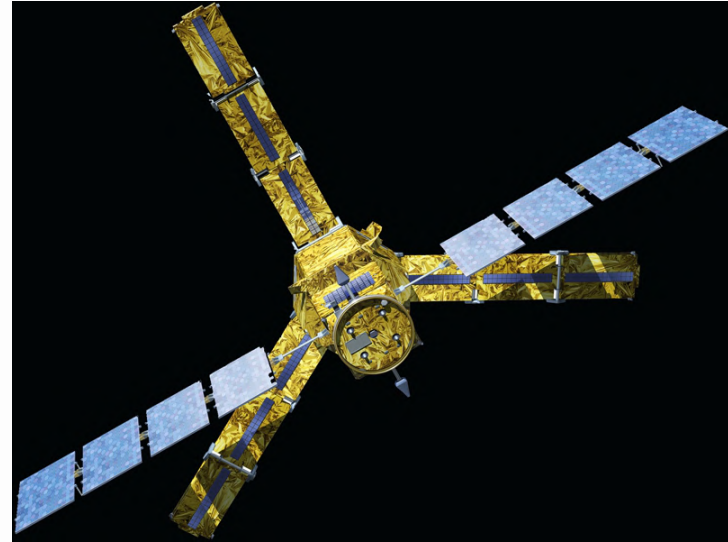
- Temperature
- Humidity
- Surface
- O₃



SWOT : for the lakes
2021

A permanent evolution : observations

SMOS: one of the
satellites used for soil
humidity
2nd Novembre 2009



Proba-V: for
vegetation (LAI: Leaf
Area Index)
7th May 2013

A permanent evolution : observations

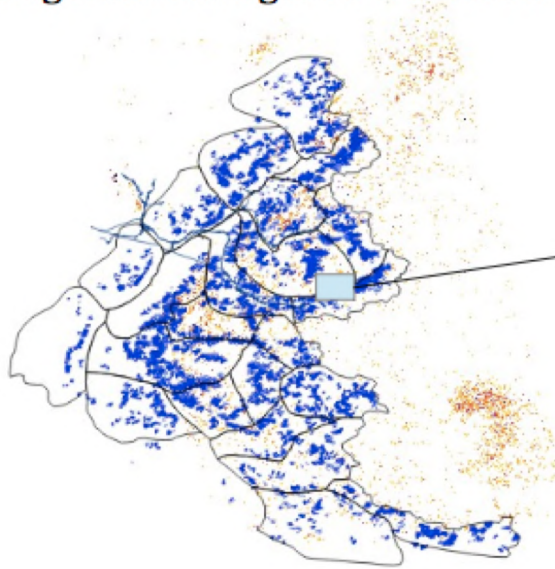
Sentinel 1 :

3rd April 2014 & 25 April 2016

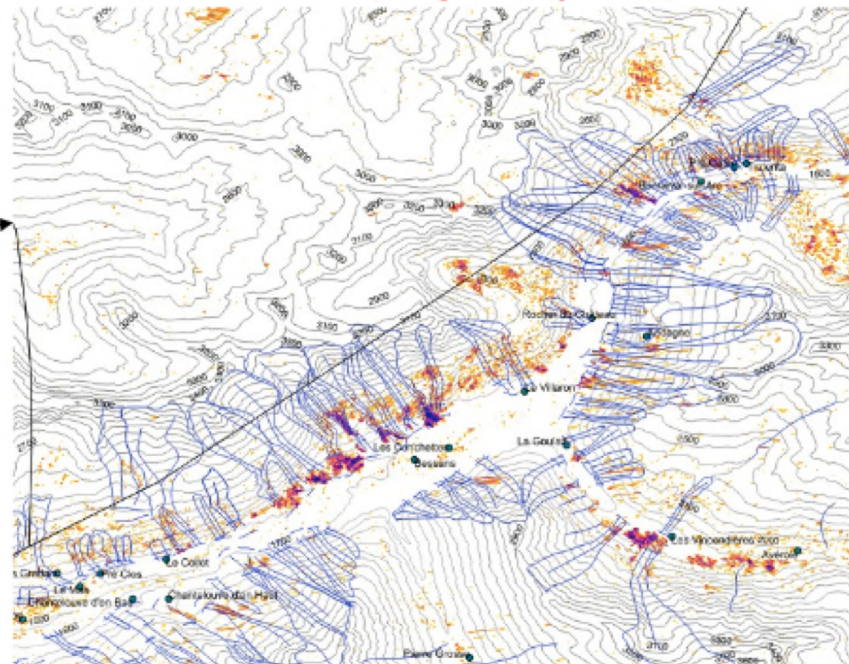
- SAR C-band 20m : avalanche detection



**Avalanche debris in the French Alps
using 2 SAR images : 5 and 11 January 2018**



**Very good agreement with avalanche event
In situ records (8-9 January 2018)**



A permanent evolution : observations



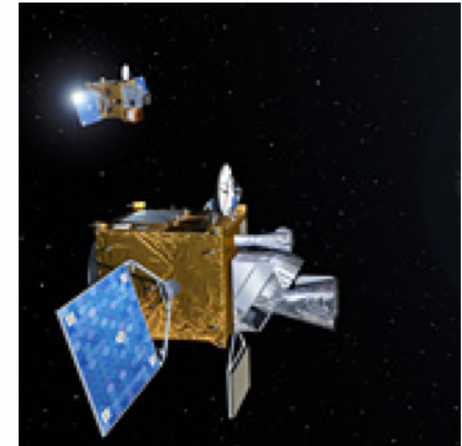
MTG :

MTG-I : Q3 2021

MTG-S : Q1 2023

very important for regional models

- IRS : T and Hu profiles
- Lightning Imager : convective activity

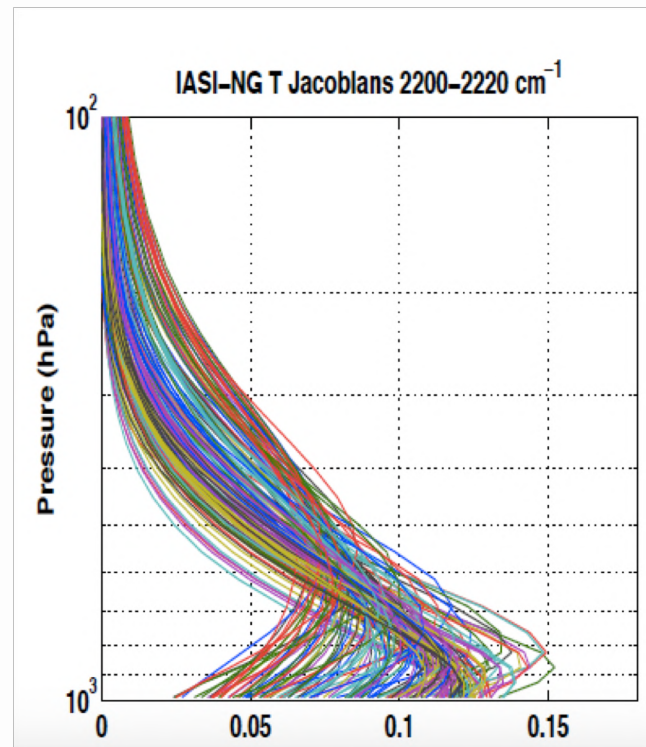


EPS-SG :

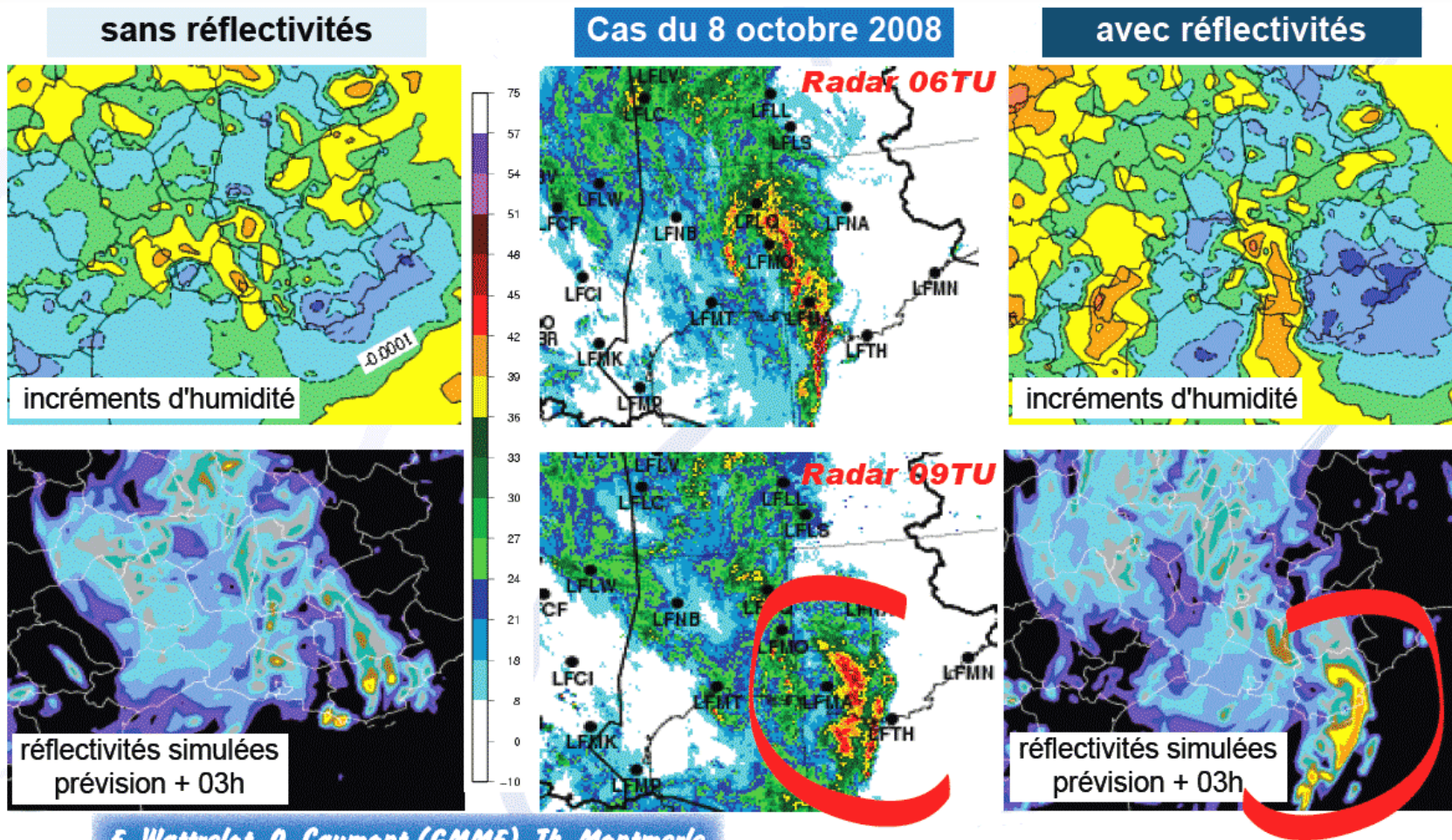
Metop-SG-A : Q4 2022

Metop-SG-B : Q4 2023

IASI NG



Prévision et l'assimilation des données radar

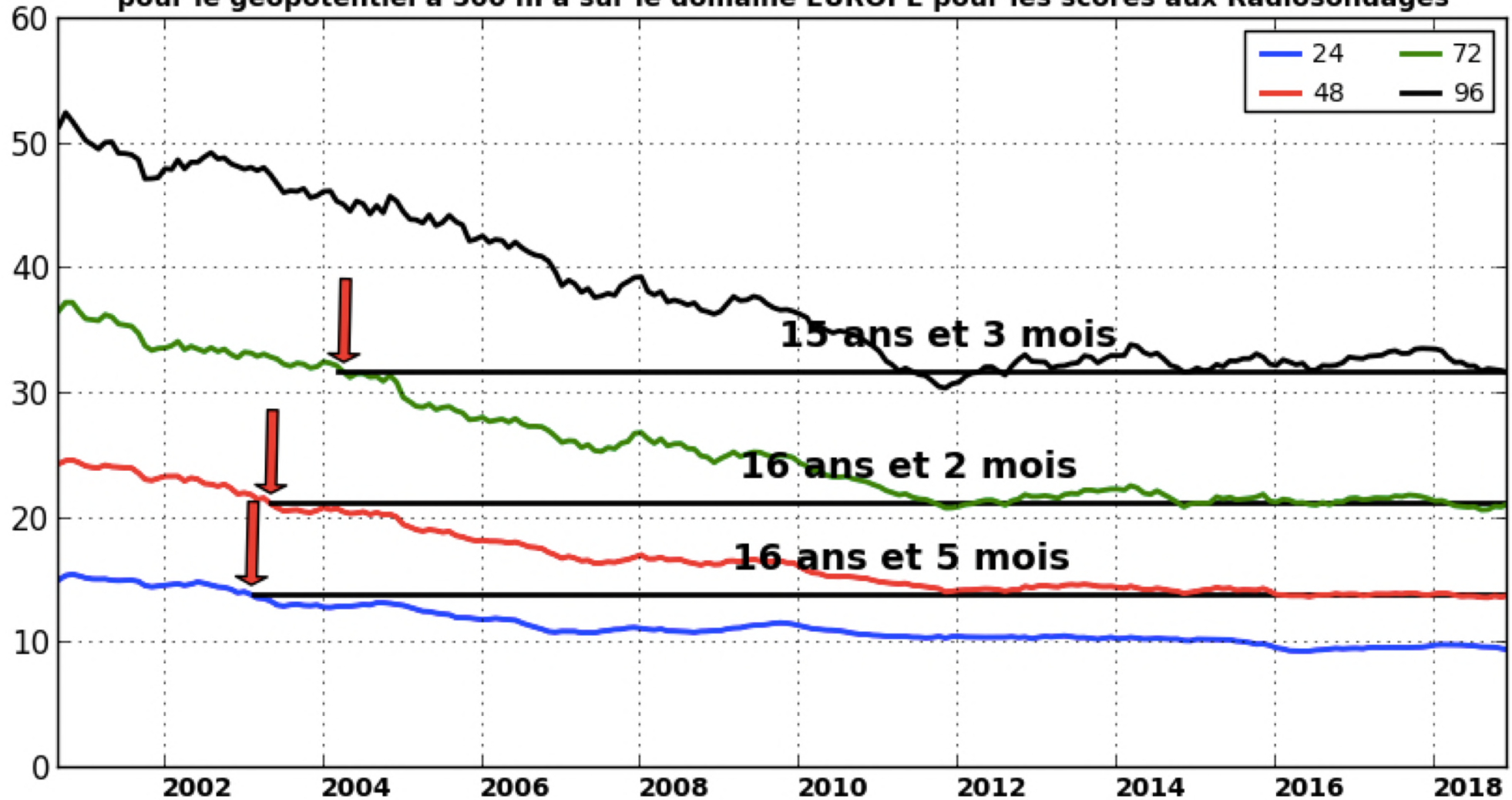


Système Arome à résolution horizontale de 2,5 km :

- **Utilisation opérationnelle des réflectivités des radars dans l'analyse de l'humidité**

La qualité des prévisions

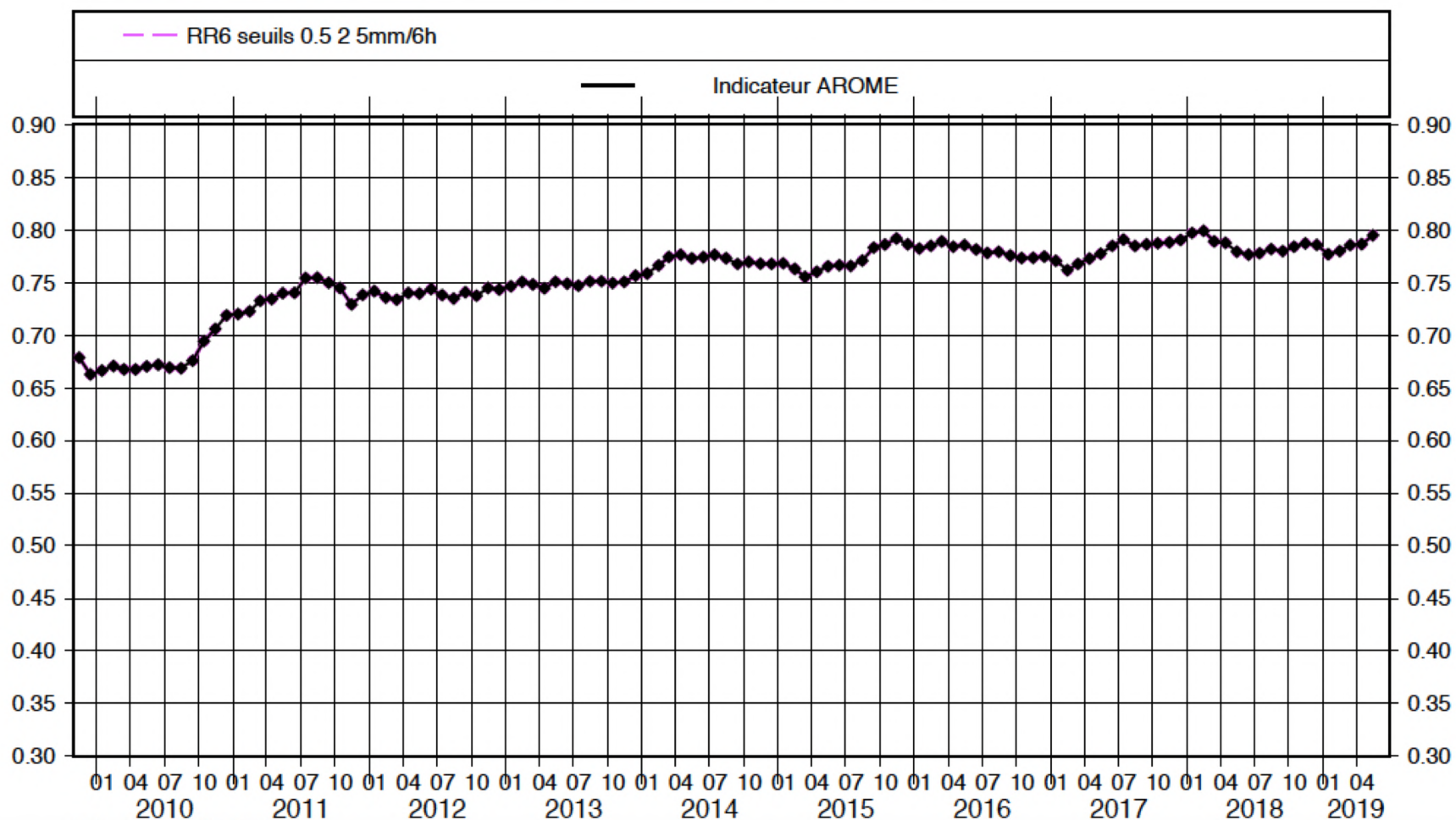
**Combien de temps faut-il pour gagner 24 heures de qualité de prévision ?
pour le géopotential à 500 hPa sur le domaine EUROPE pour les scores aux Radiosondages**



DIDOT/COMPAS 04 juillet 2019

La qualité des prévisions

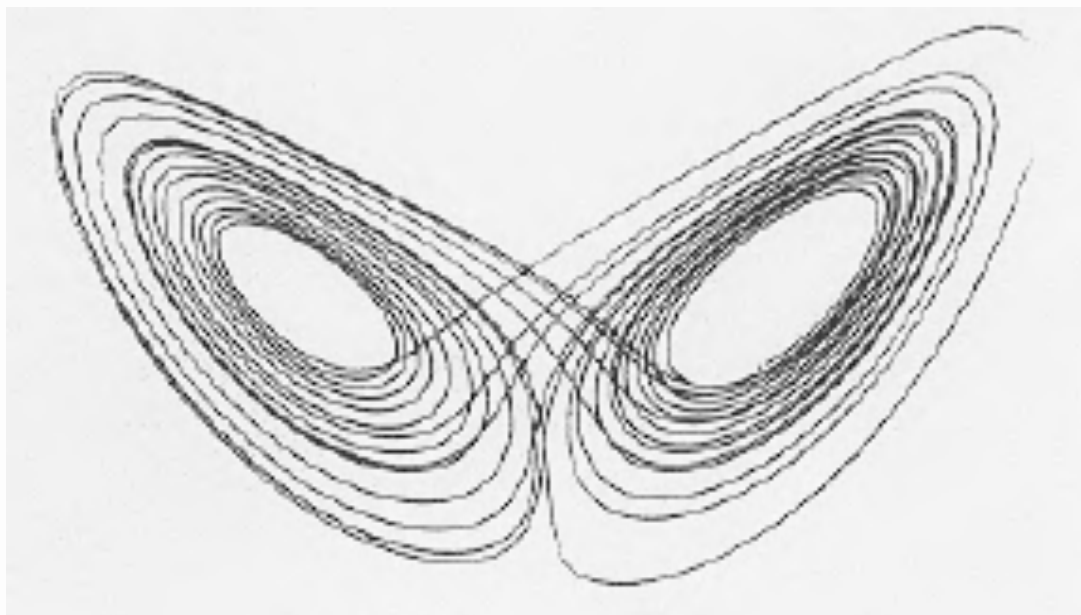
Evolution mensuelle de l'indicateur pondéré annuel Modèle AROME Grille FRANGP0025
et déclinaison suivant 1 paramètre(s)
Echéances 6 à 24 – Réseau 0h



Météo-France DirOP/COMPAS/COM
Actualisé le 28/06/2019 03:04

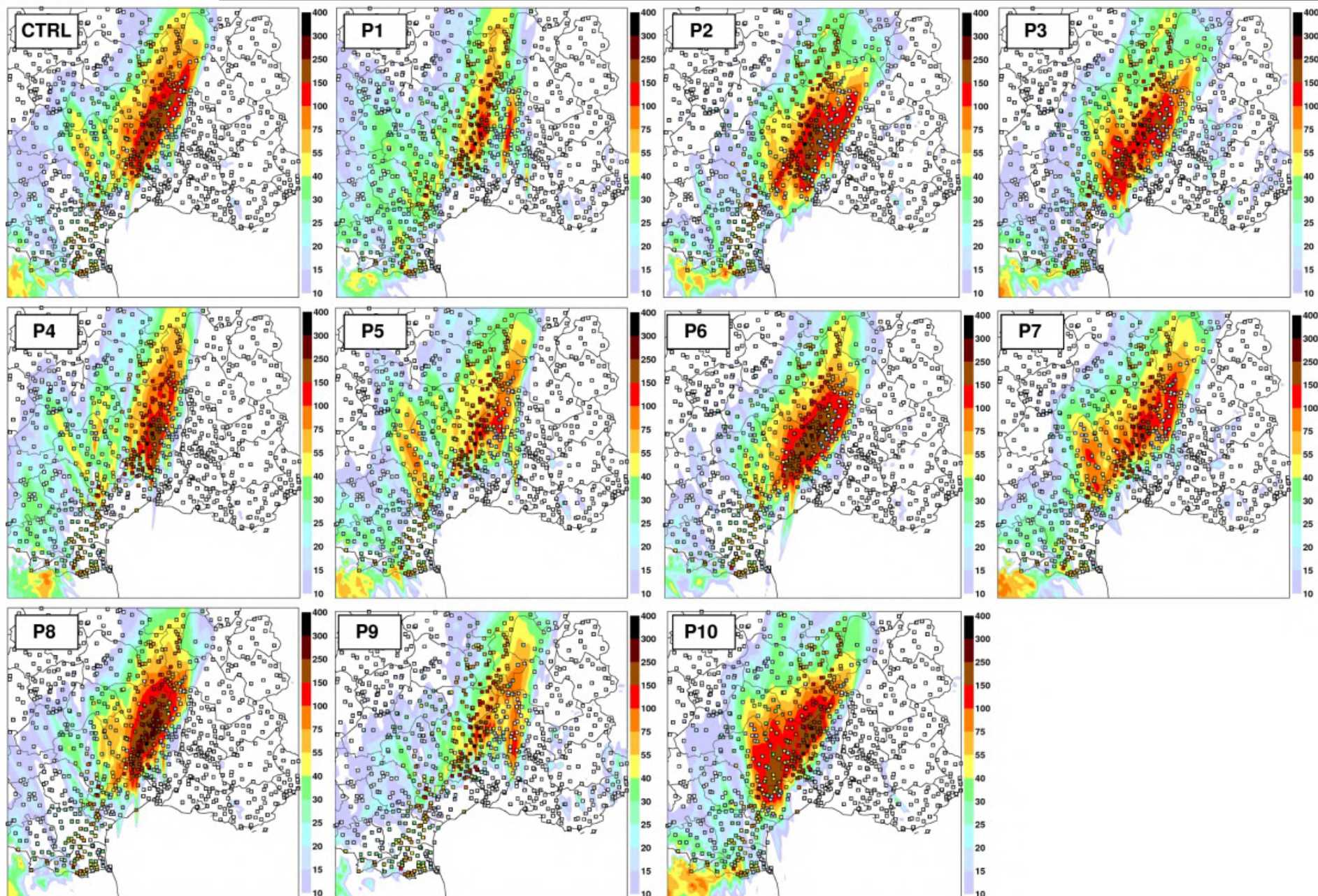
Mais l'atmosphère est chaotique

La sensibilité aux conditions initiales

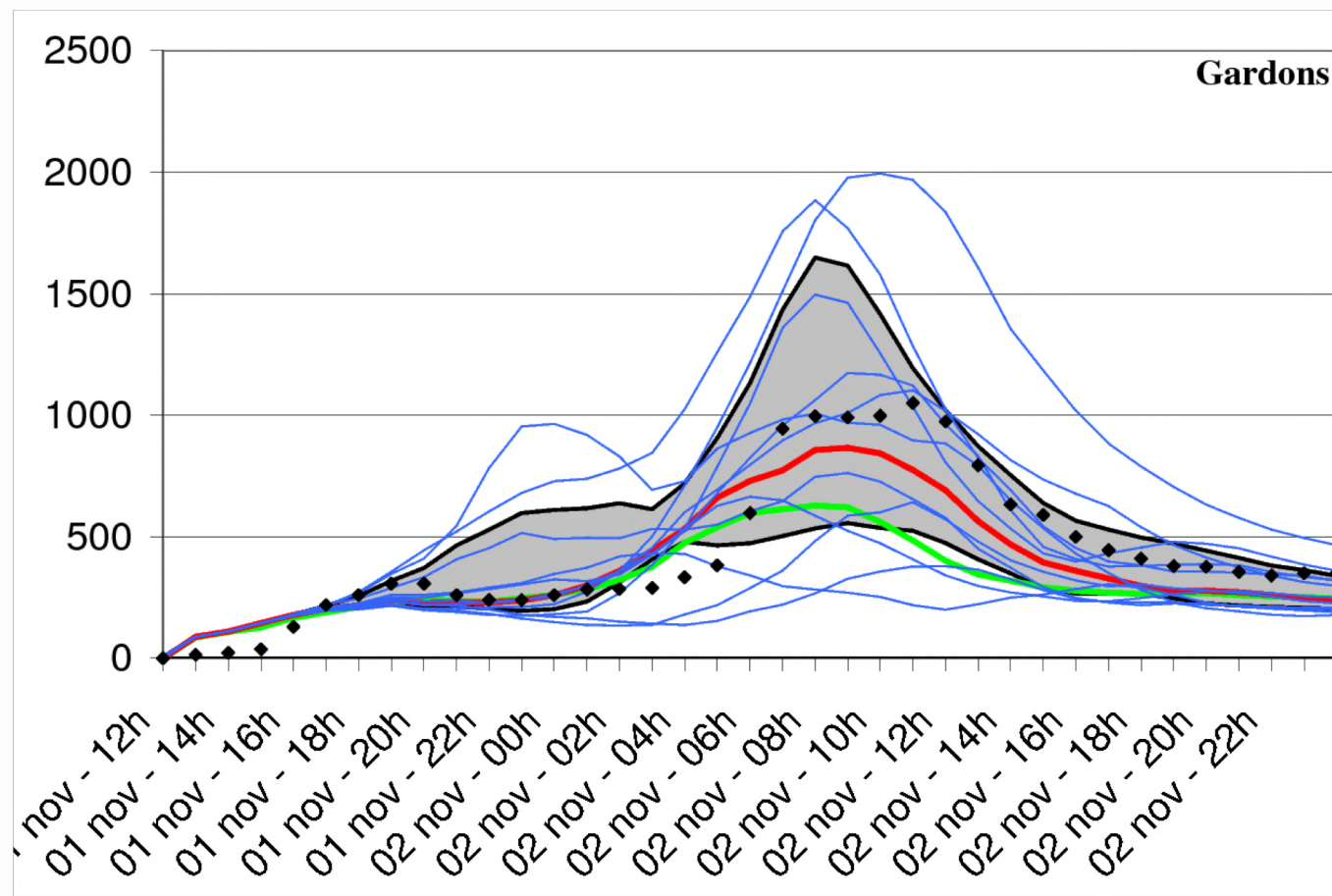


Quelle confiance peut-on avoir dans une seule prévision ?

Prévision d'ensemble



Prévision d'ensemble



Débits pour le bassin des Gardons (Cévennes) :

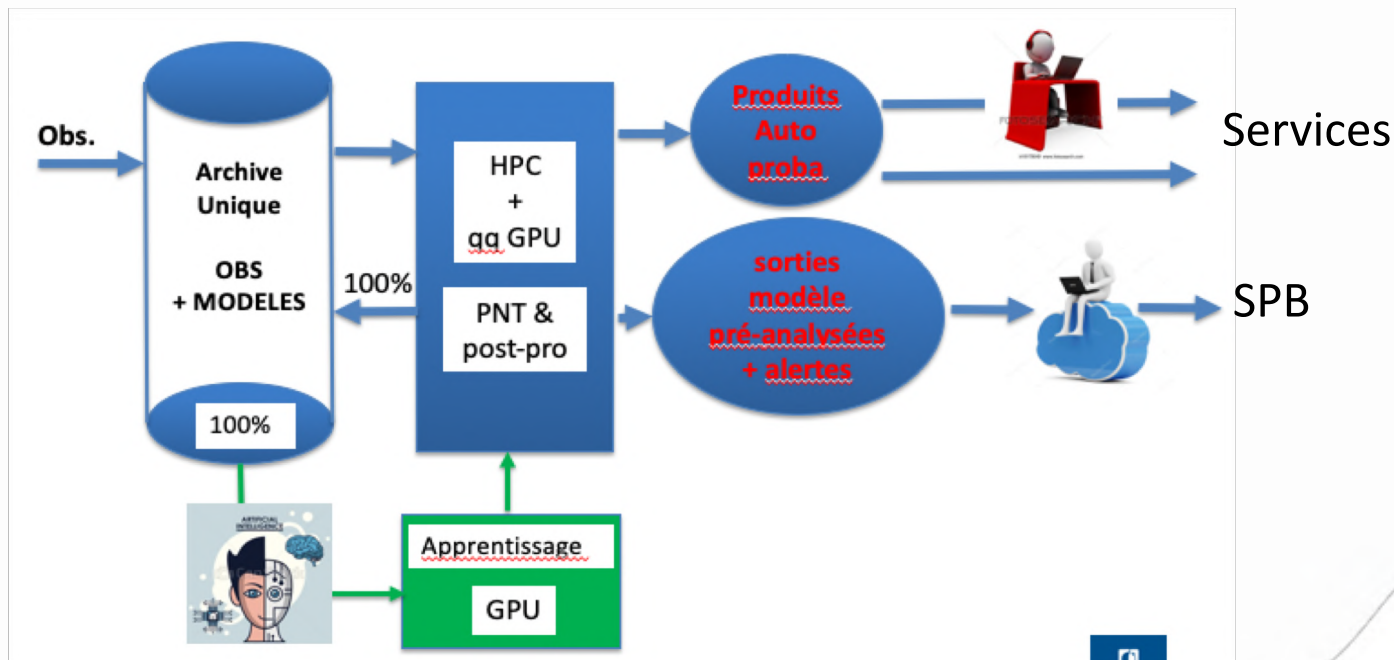
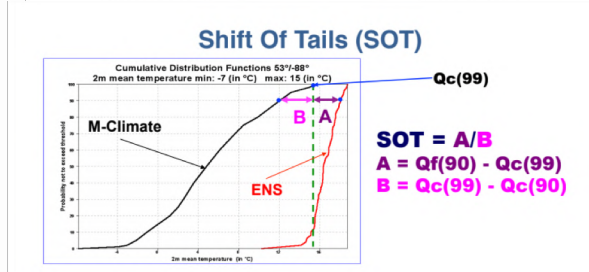
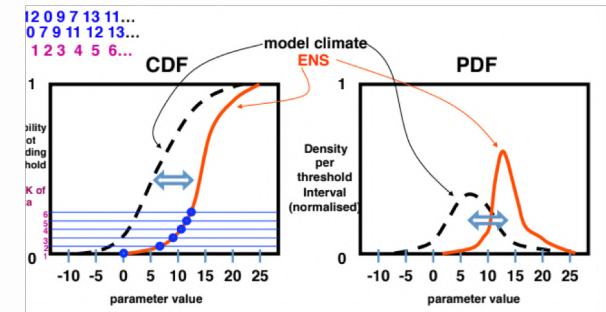
Débits simulés en utilisant les membres de la PE AROME (courbes bleues), la médiane de l'ensemble est indiquée en rouge et l'enveloppe entre les quartiles 25% et 75% est grisée. La courbe verte est la courbe de débit simulée lorsque la prévision AROME opérationnelle est utilisée.

Les observations de débits sont indiqués par les points noirs

Traitement automatique des prévisions d'ensemble



Traitement de l'information ensembliste (aide à la décision, détection phénomène extrême)
Intelligence artificielle
Accès rapide aux données (apprentissage)
Réorganisation profonde de la chaîne opérationnelle



Demain

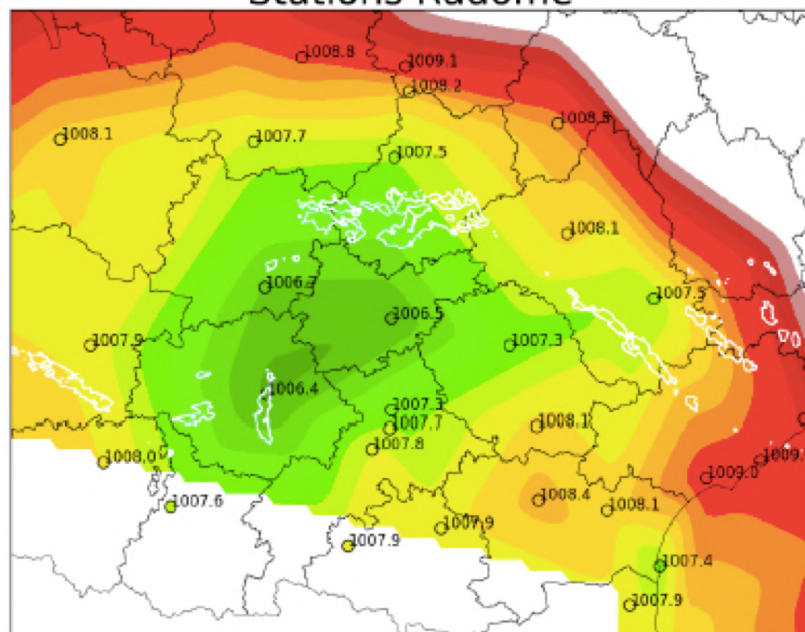
Les objets connectés

Problèmes : ✗ conditions de mesures hétérogènes

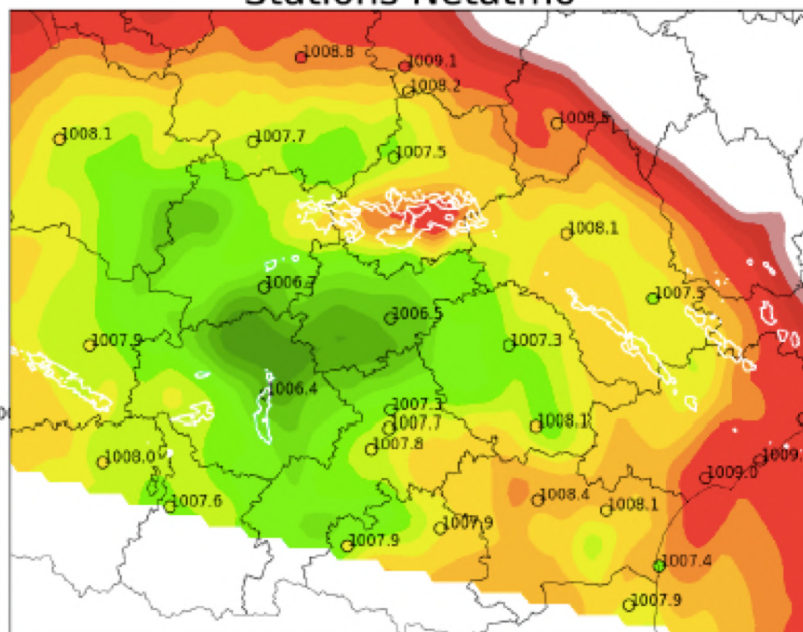


[Napoly, 2017]

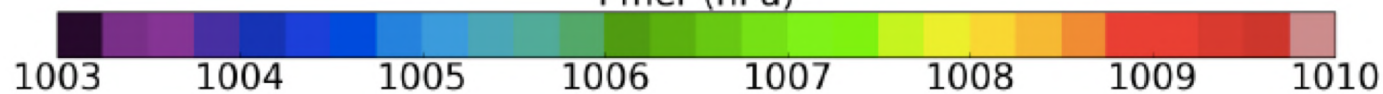
Stations Radome



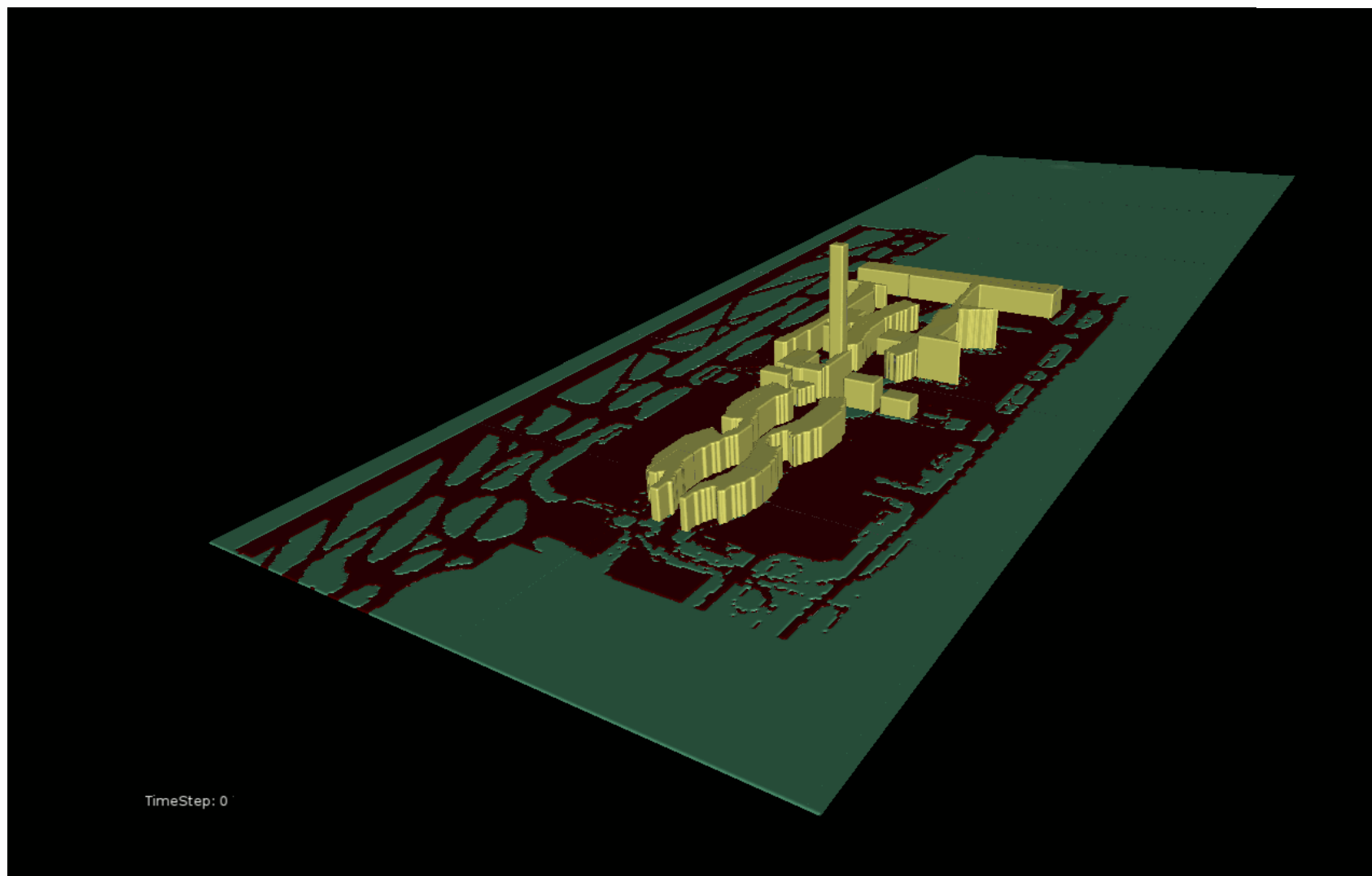
Stations Netatmo



Pmer (hPa)



Le brouillard à CDG : la modélisation à l'état de l'art



An aerial photograph of a town nestled in a valley, partially obscured by thick white clouds. The town features numerous buildings with dark roofs and some green spaces. A weather map is overlaid on the lower portion of the image, showing white contour lines with numerical values such as 1010, 1015, 1020, 1025, 1030, 1035, and 1040. Arrows on the map indicate wind direction and speed. The background is a solid blue gradient.

Merci de votre attention



METEO FRANCE