

La Prévision Numérique du Temps et les Evènements Méditerranéens

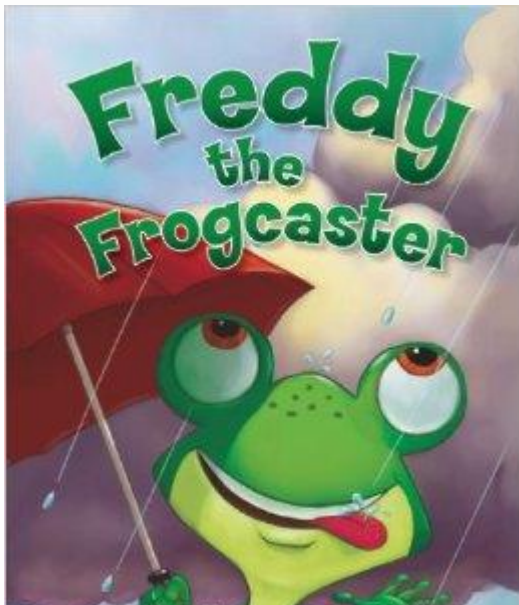
Saint-Gély du Fesc, le 16 décembre 2021

Marc Pontaud
Directeur de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
de Météo-France



**METEO
FRANCE**

Quel temps demain ?



Equations fondamentales de l'atmosphère

A la fin du 19^{ième} siècle :

6 équations pour 6 inconnues : **un problème bien posé**
(le mouvement : U , V et W ; la température T ; la masse : ρ ; Gaz parfait : P)

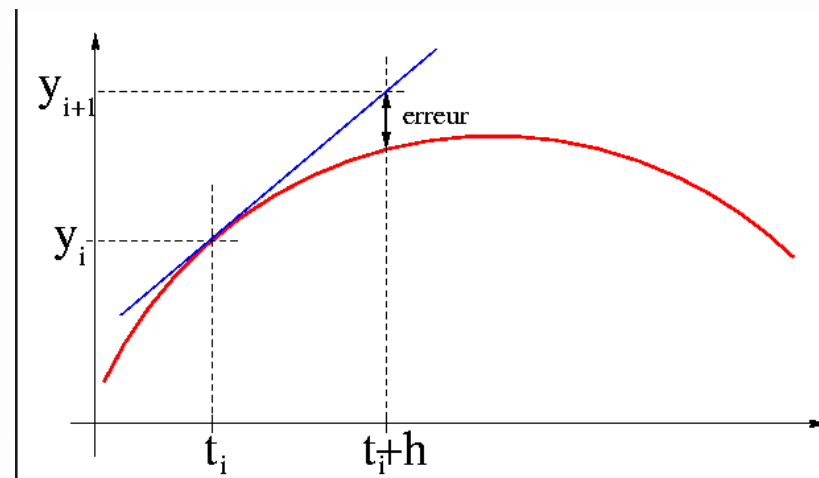
**Le problème est bien posé (*au sens mathématique*)
mais aucune solution analytique n'a été trouvée ...**

Début du 20ième siècle

L'impasse analytique : la voie numérique

Prof. C. Abbe, 1901 :

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



L.F. Richardson (1881-1953) :

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

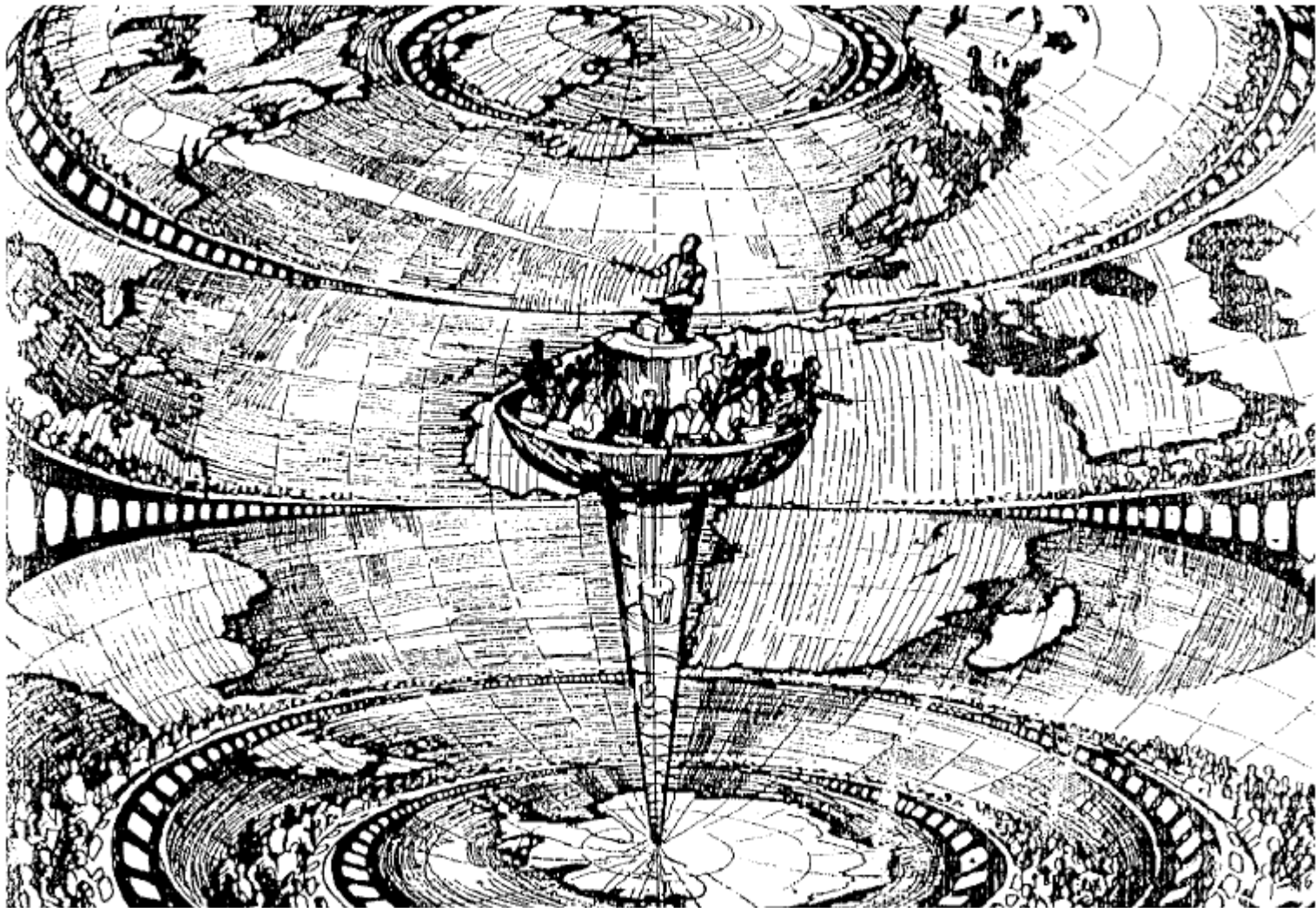
Il imagine :

- ⇒ 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

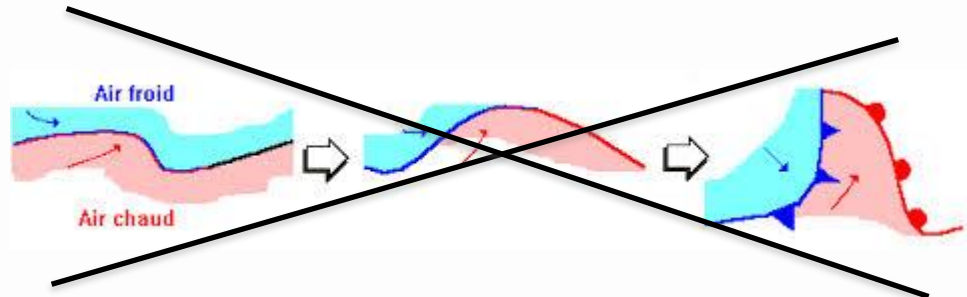
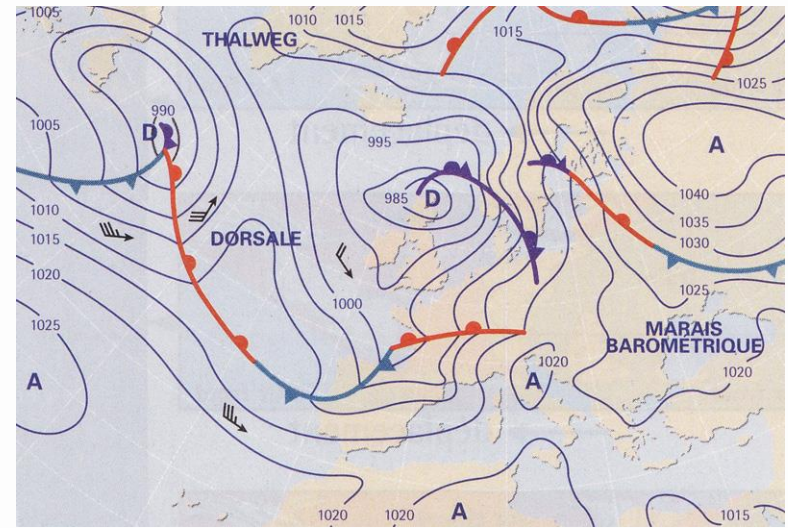
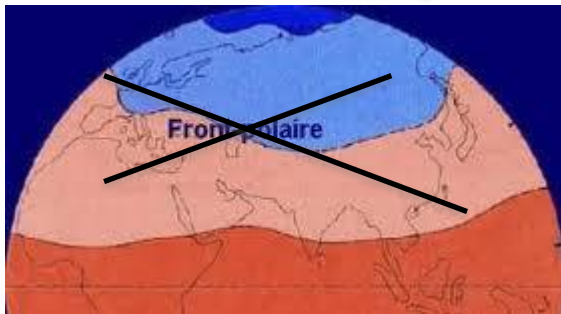
Pas d'observation pour construire les conditions initiales

1920 - 1940

COMPRENDRE AVEC LES OBSERVATIONS :

Bjerknes et Solberg (1922)

~~« POLAR FRONT »~~

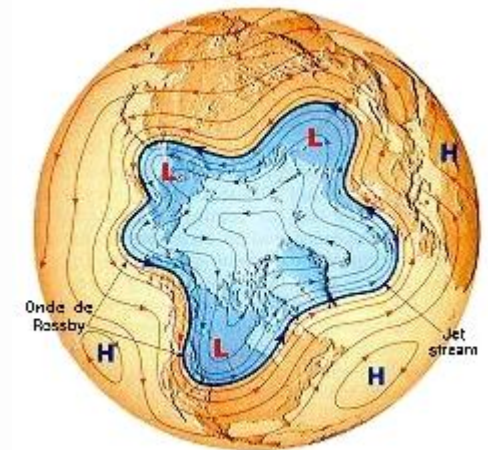
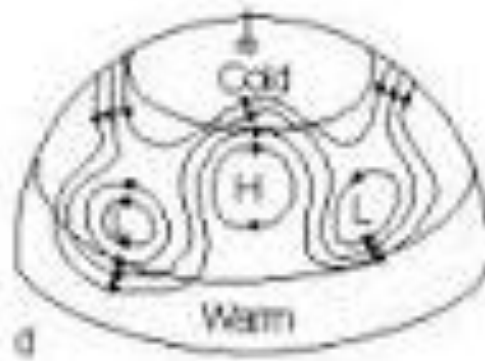
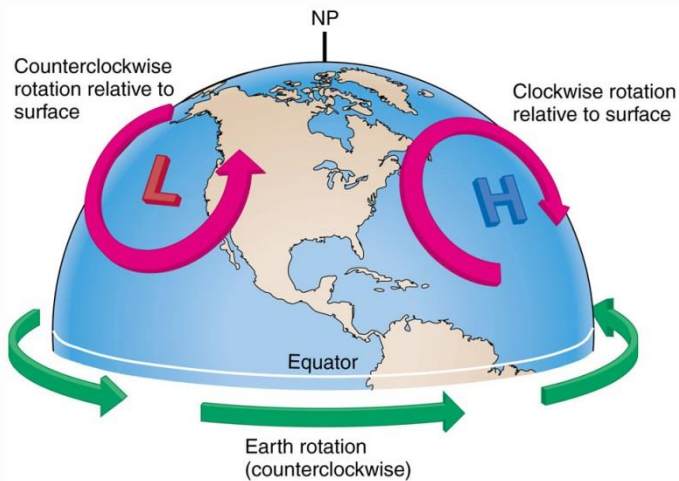


1920 - 1940

COMPRENDRE AVEC DES EQUATIONS SIMPLIFIEES:

-> simplifier les équations avec un sens physique

Equation d'une perturbation de tourbillon (Rossby, C.-G., 1939).
(tourbillon \Leftrightarrow vent \Leftrightarrow pression)

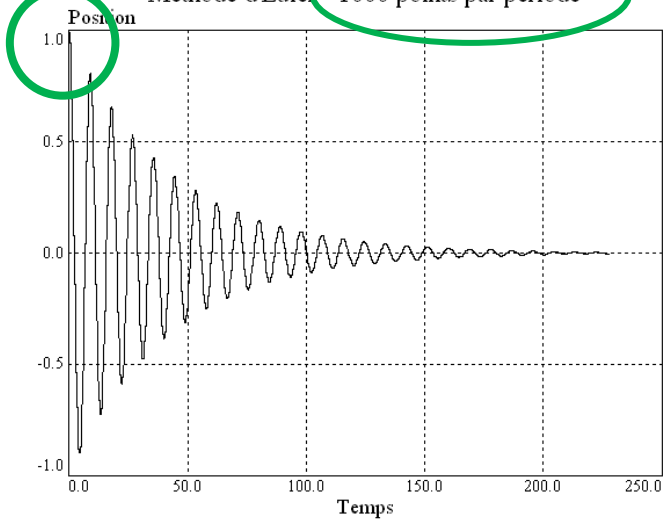


1920 - 1940

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

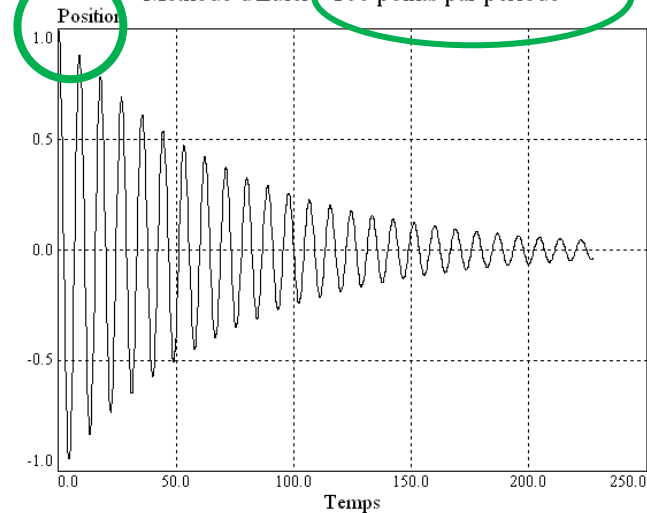
STABLE

Méthode d'Euler - 1000 points par période



STABLE

Méthode d'Euler - 100 points par période



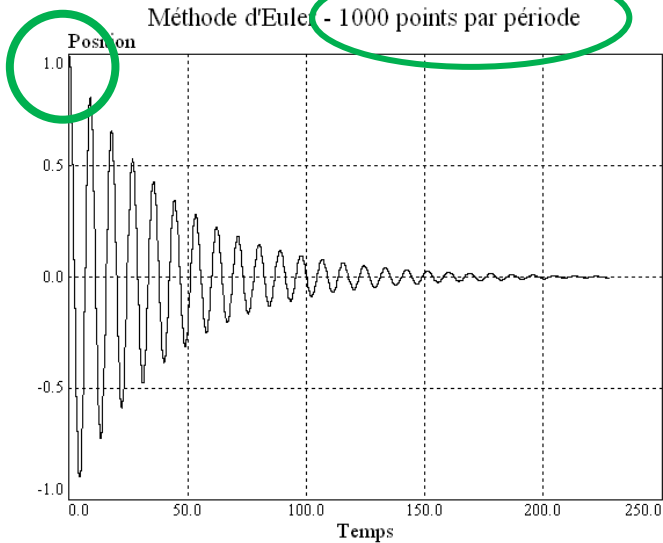
1920 - 1940

COMPRENDRE LA RESOLUTION NUMERIQUE :

Courant-Fiedrichs-Lewy (1928) : le critère CFL

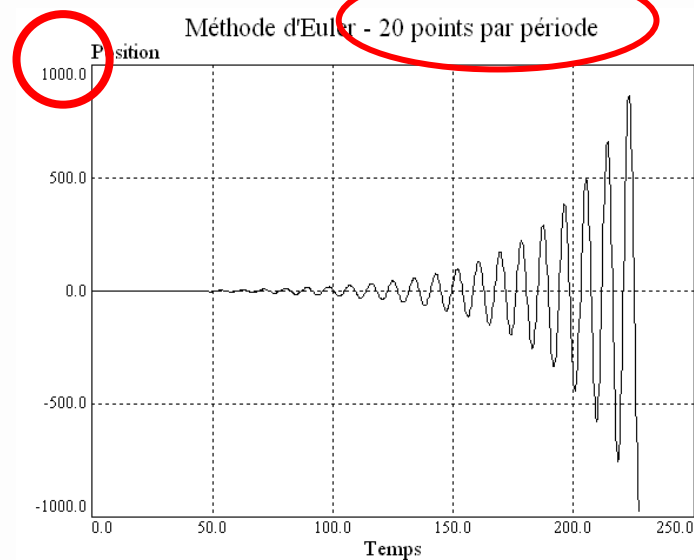
STABLE

Méthode d'Euler - 1000 points par période



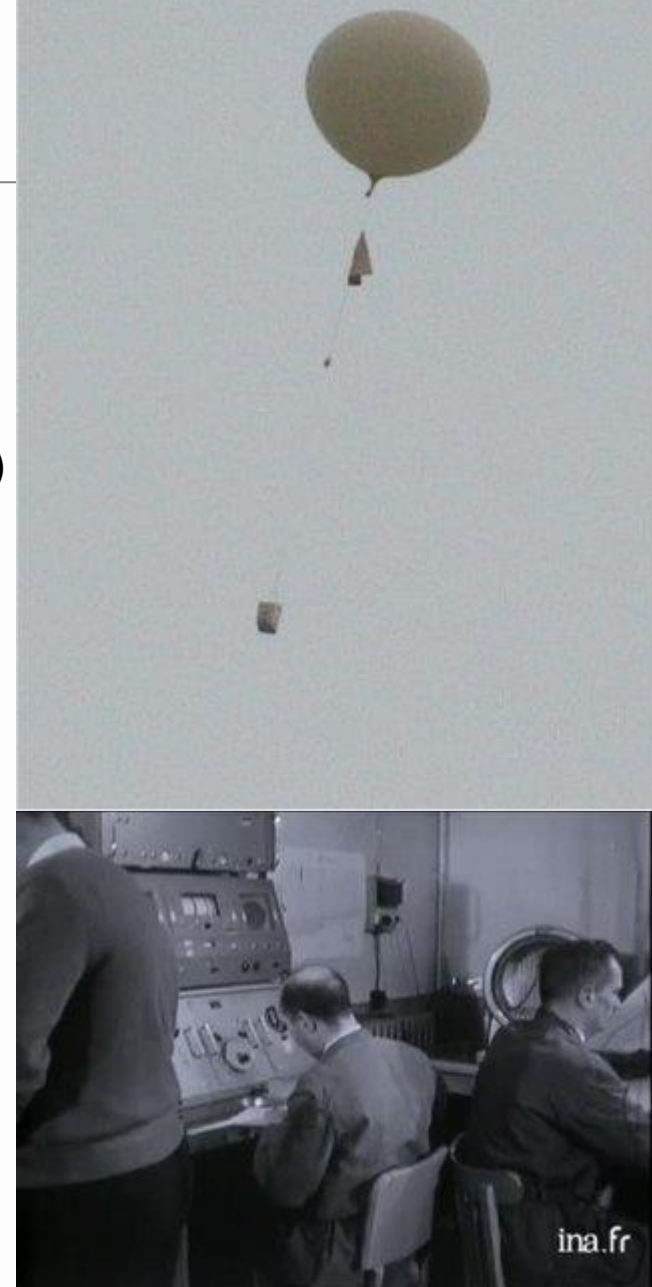
INSTABLE

Méthode d'Euler - 20 points par période



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)

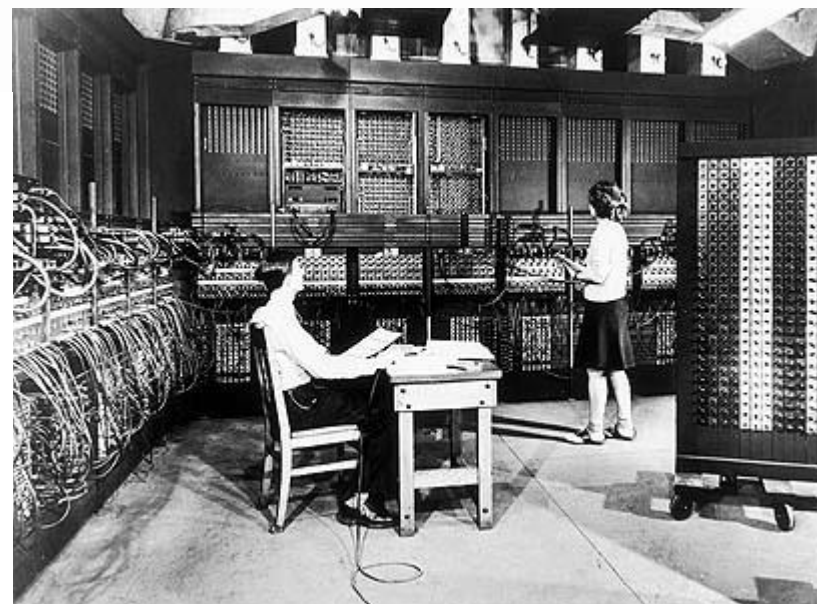
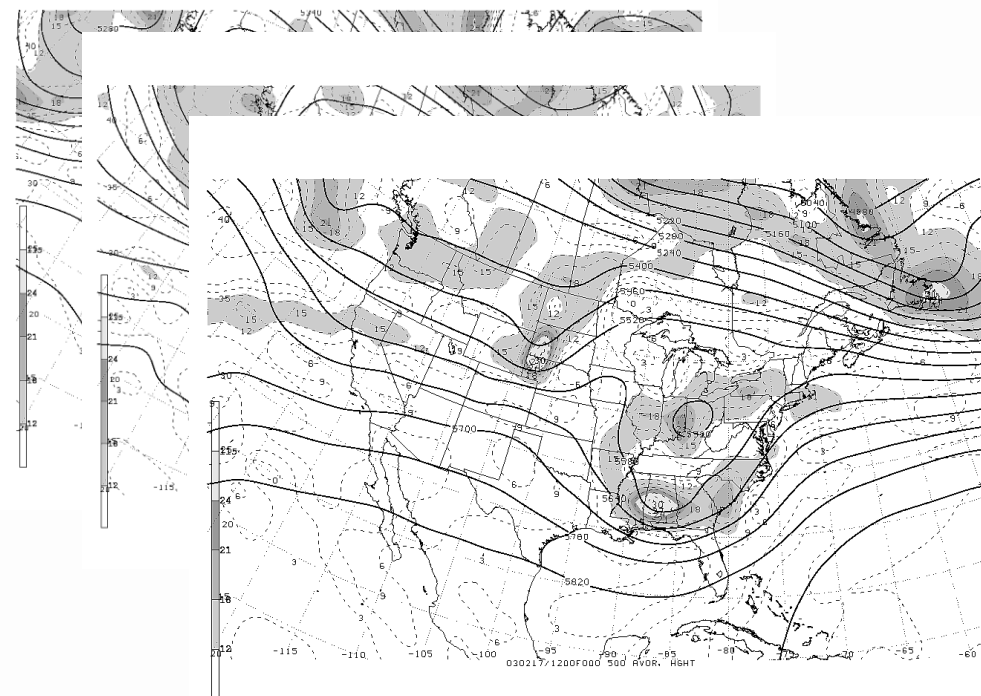
Première prévision numérique du temps avec le calculateur ENIAC

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

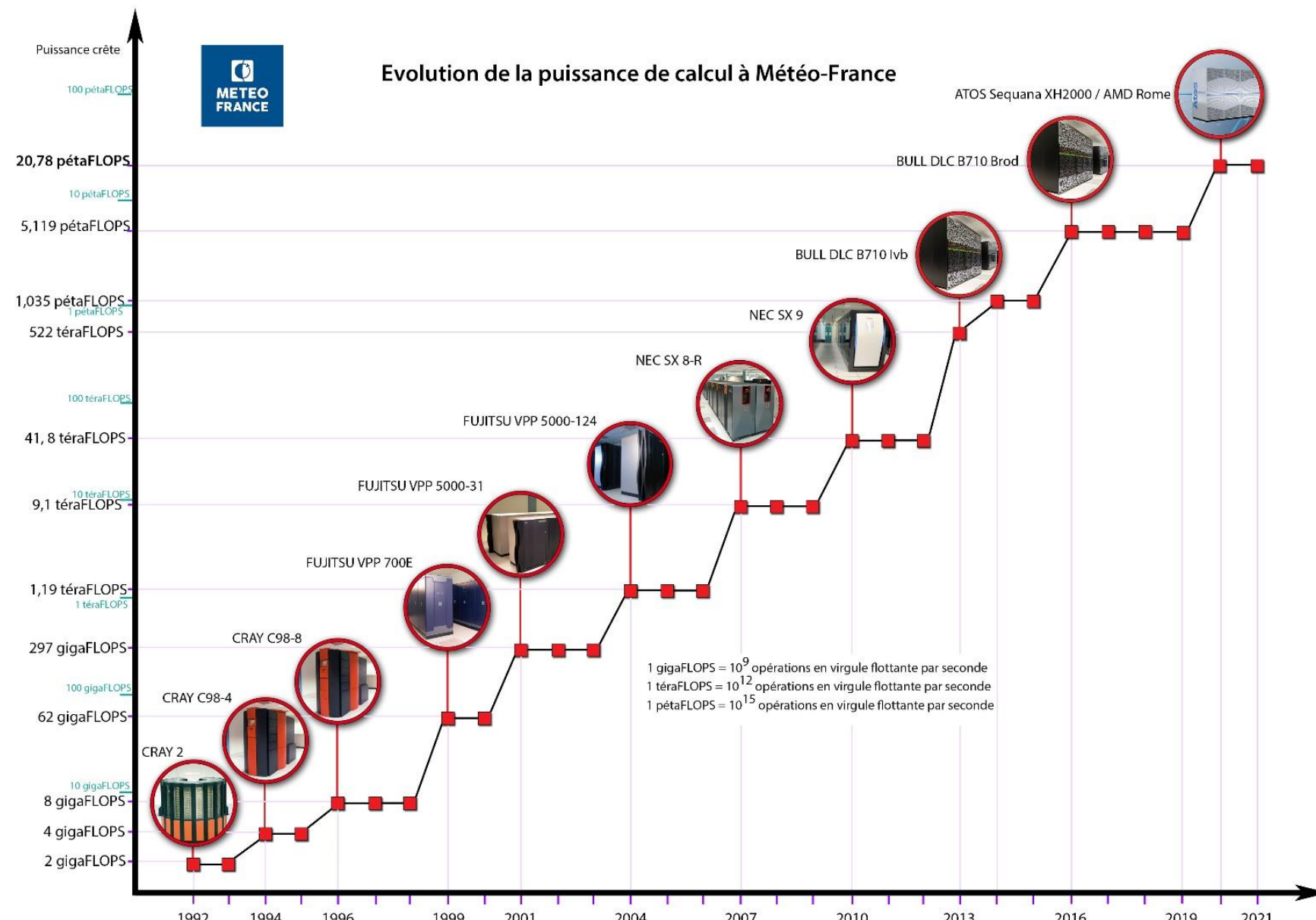


1945 - ...

A partir de là :

- La puissance des calculateurs a augmenté
- La compréhension de 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

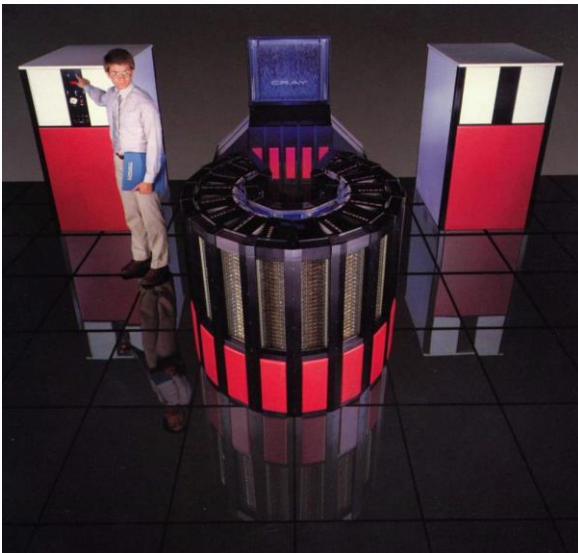
HPC Meteo-France



BULL B710 DLC

ATOS Sequana (2021) : 2 x 10 Pflops

ATOS :	10 000 000 000 000 000	Flops
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



Progrès théoriques : la cyclogénèse

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

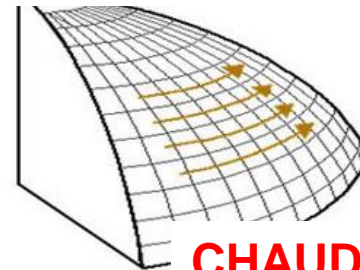
Deux couches avec chacune une perturbation de tourbillon (de type Rossby)

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

Quand $\Delta T > \Delta T_{\text{crit.}}$, \Rightarrow 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.

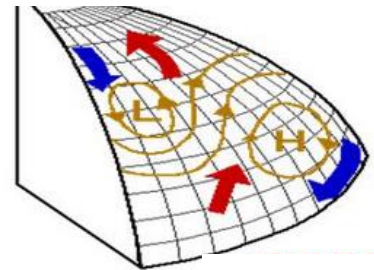
FROID



CHAUD

Baroclinic Stability

+ FROID



+ CHAUD

Baroclinic

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.

\Rightarrow **la cyclogénèse** (Modèle Quasi-geostrophique : 1960 -> 1980)

Progrès théoriques : la frontogénèse

Hoskins (1978)

Le modèle quasi-géostrophique (couches de tourbillon) avec la divergence (une partie)

Et il réussit à résoudre mathématiquement ce système d'équations (!)

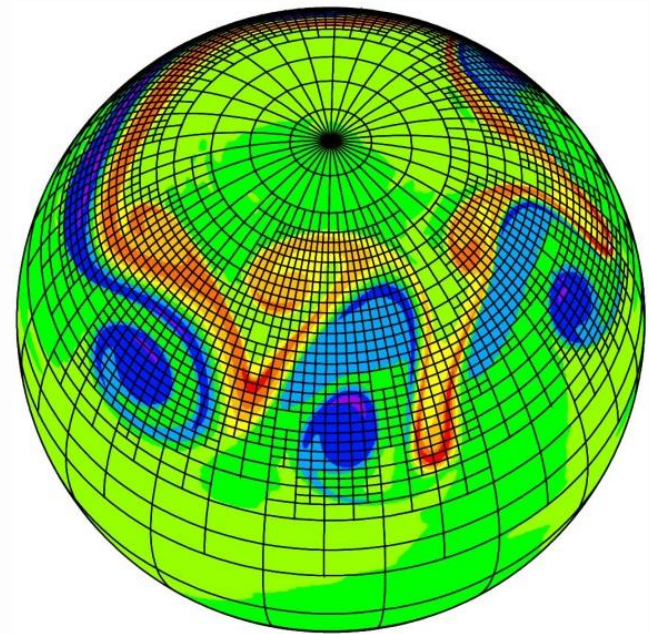
Il retrouve l'instabilité barocline, mais avec la prise en compte du vent non-géostrophique, il obtient :

-1- un creusement plus concentré des dépressions et un étalement des anticyclones

-2- et suivi par la formation de fronts froid et chaud

⇒ **la frontogénèse** (Modèle Semi-geostrophique)

⇒ **Les Equations Primitives** (divergence complète)



Progrès théorique : les équations primitives

Equations primitives :

Tout sauf pour la verticale où on fait l'approximation hydrostatique

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

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

Modèles en équations primitives : depuis 1980

Aujourd'hui tous les modèles mondiaux et de climat



Les modèles non hydrostatiques (2008 - ...)

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

L'accélération verticale = écart à l'équilibre hydrostatique

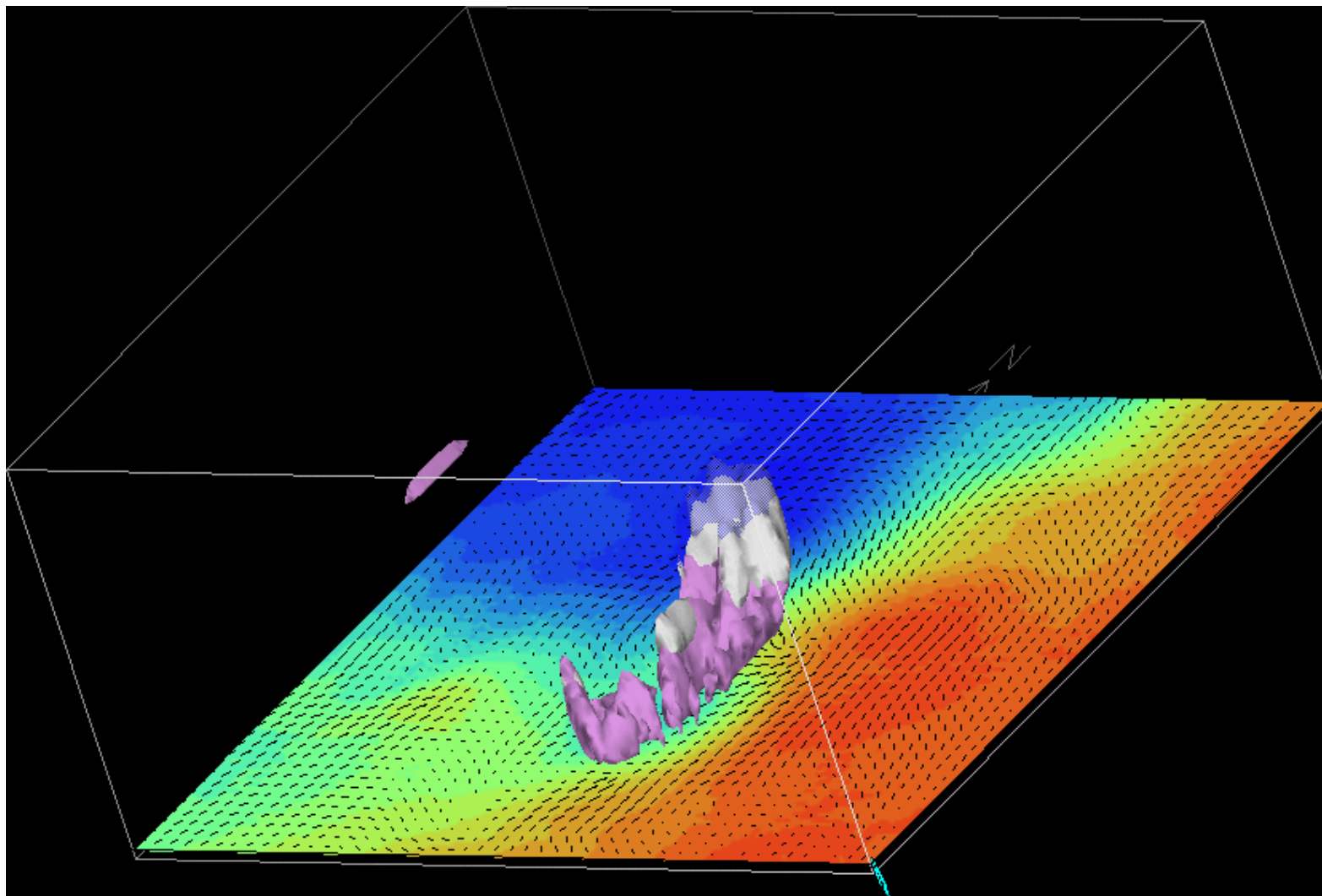
La convection et les nuages associés sont explicitement traités.

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

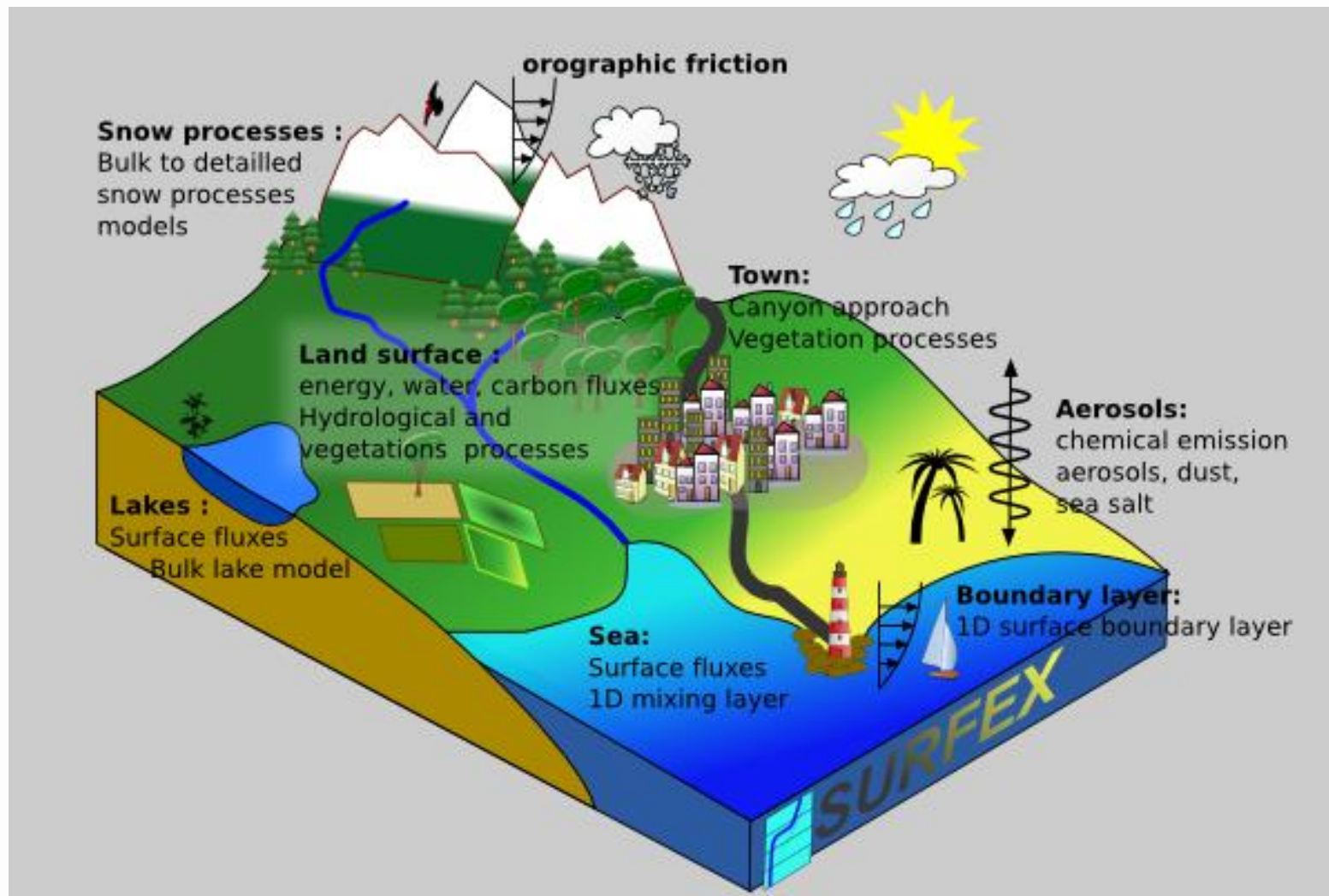
Modèles régionaux depuis 2008 ... objectif modèles mondiaux en 2030



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

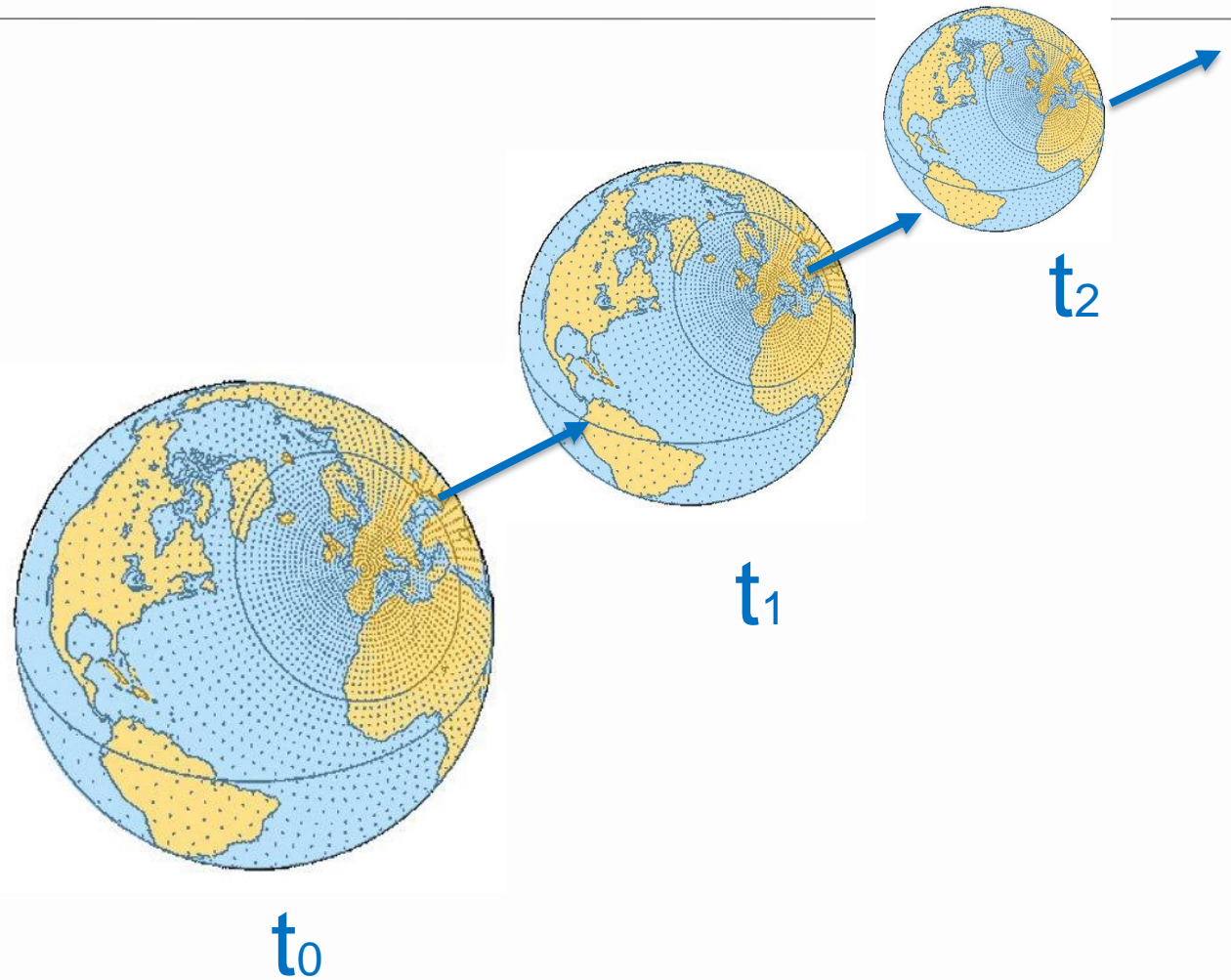


Les surfaces

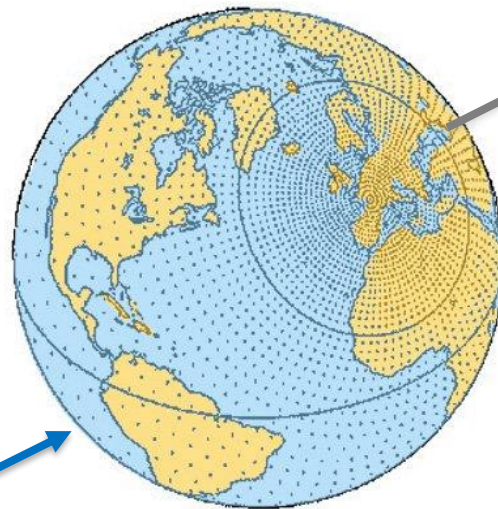


DE L'IMPORTANCE DES OBSERVATIONS

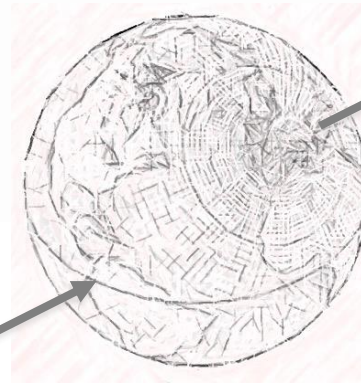
LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



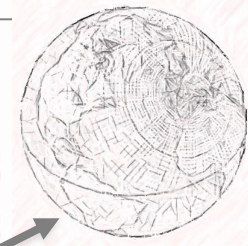
LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



t_0



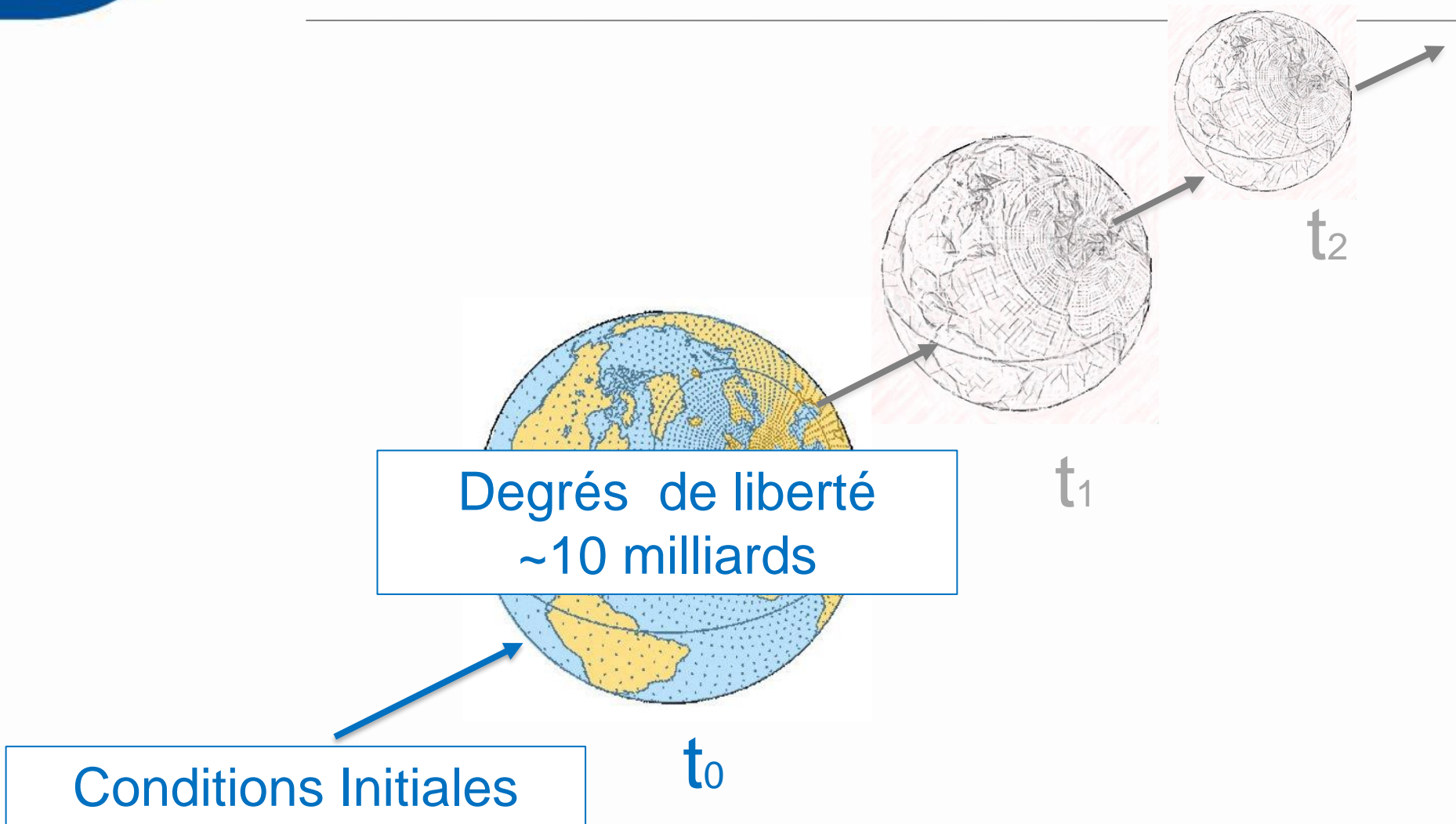
t_1



t_2

Conditions Initiales

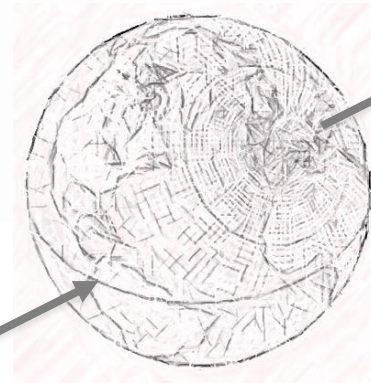
LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



Degrés de liberté
~10 milliards

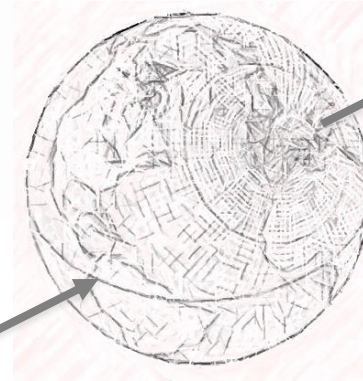


LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES

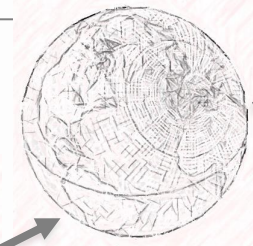


Degrés de liberté
~10 milliards

t_0



t_1



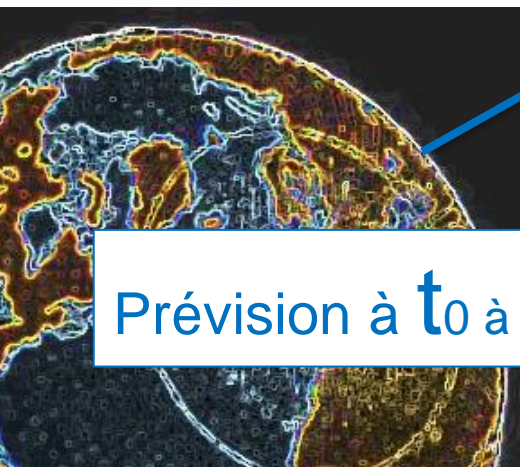
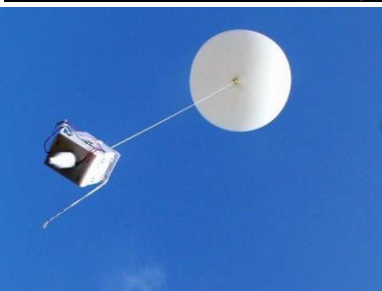
t_2

Observations disponibles :

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

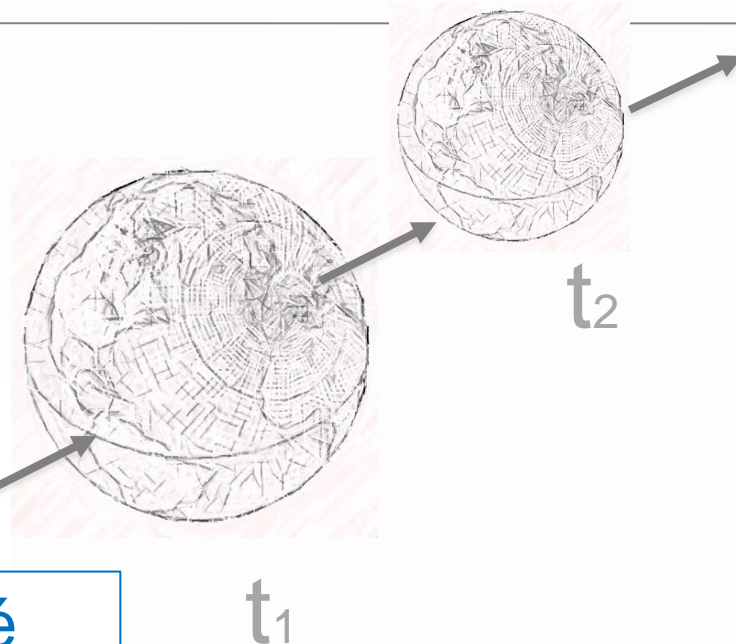
Les modèles manquent sévèrement d'observations

LA CONSTRUCTION DES CONDITIONS INITIALES



Degrés de liberté
~10 milliards

Prévision à t_0 à partir de t_{-1}

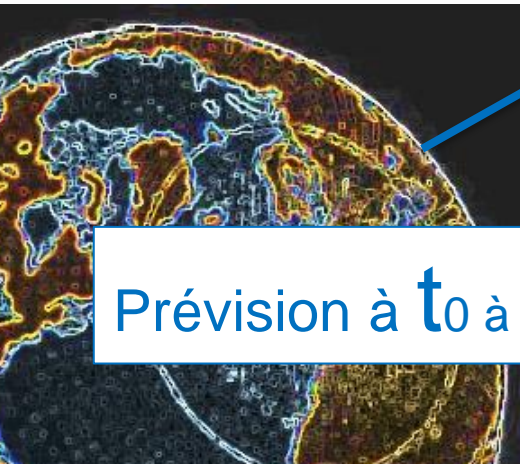


Observations disponibles :

- **10 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

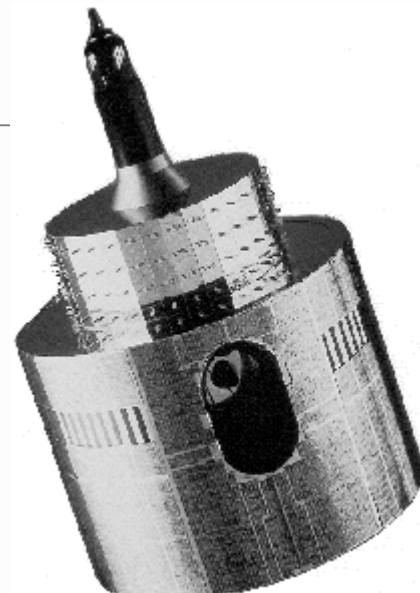
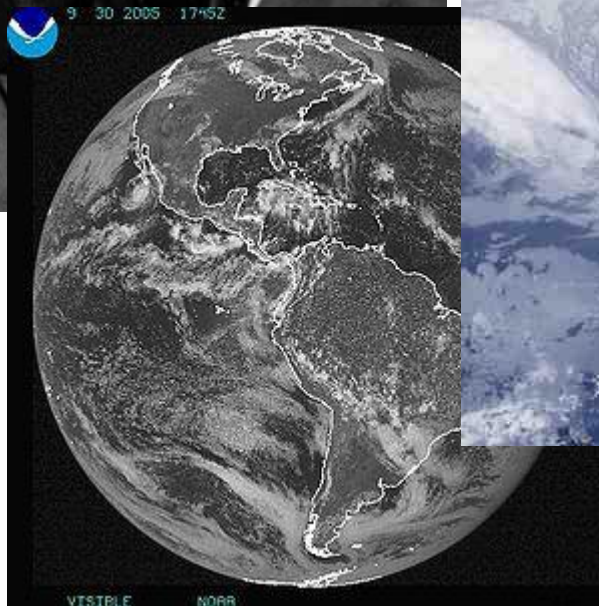
Prévision à t_0 à partir de t_{-1}

SATELLITES



Les premières images satellite
au début des années 1960

Les modèles de prévision
apprendront à les prendre en
compte dans leurs conditions
initiales à partir de 2000

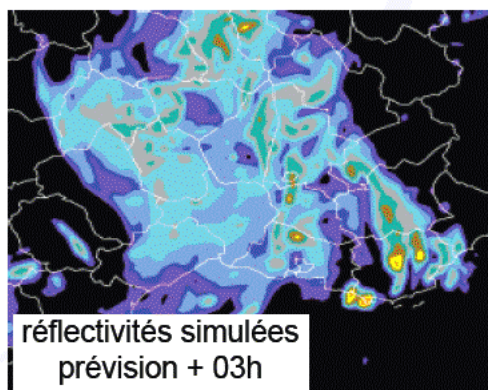
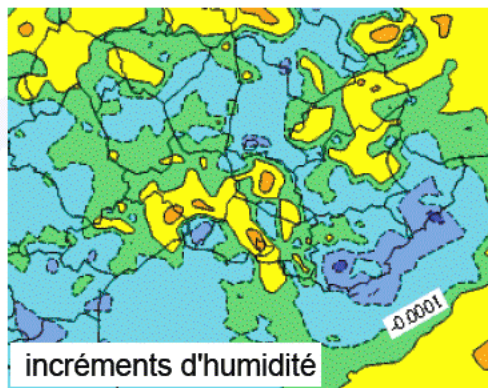


Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées par type d'observation

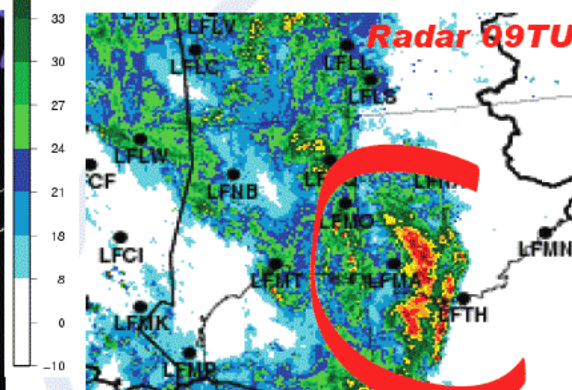
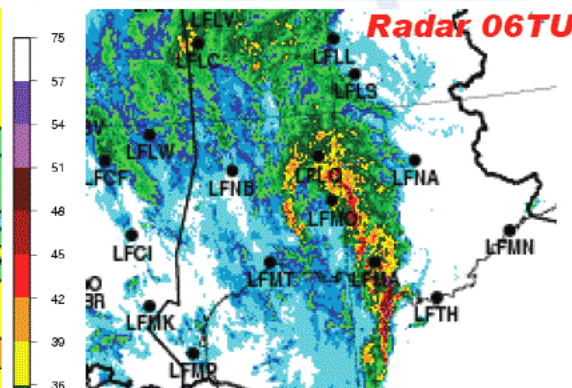


Prévision et l'assimilation des données radar

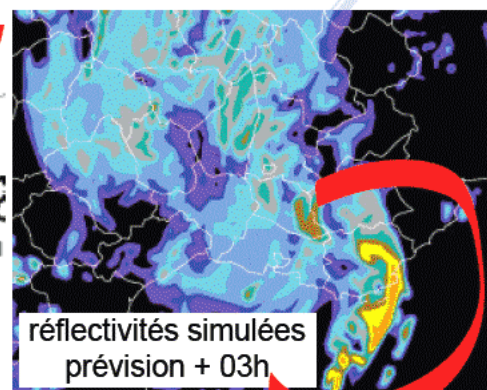
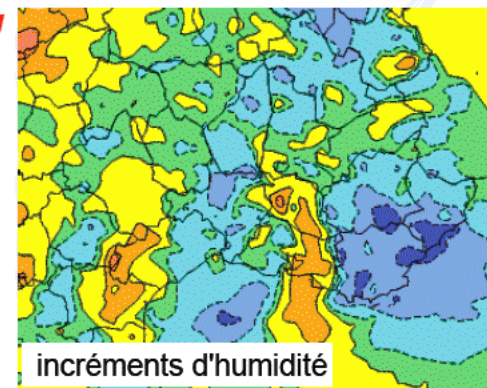
sans réflectivités



Cas du 8 octobre 2008



avec réflectivités



E. Wattrelot, O. Caumont (GMME), Th. Montmerle

Système Arome à résolution horizontale de 2,5 km :

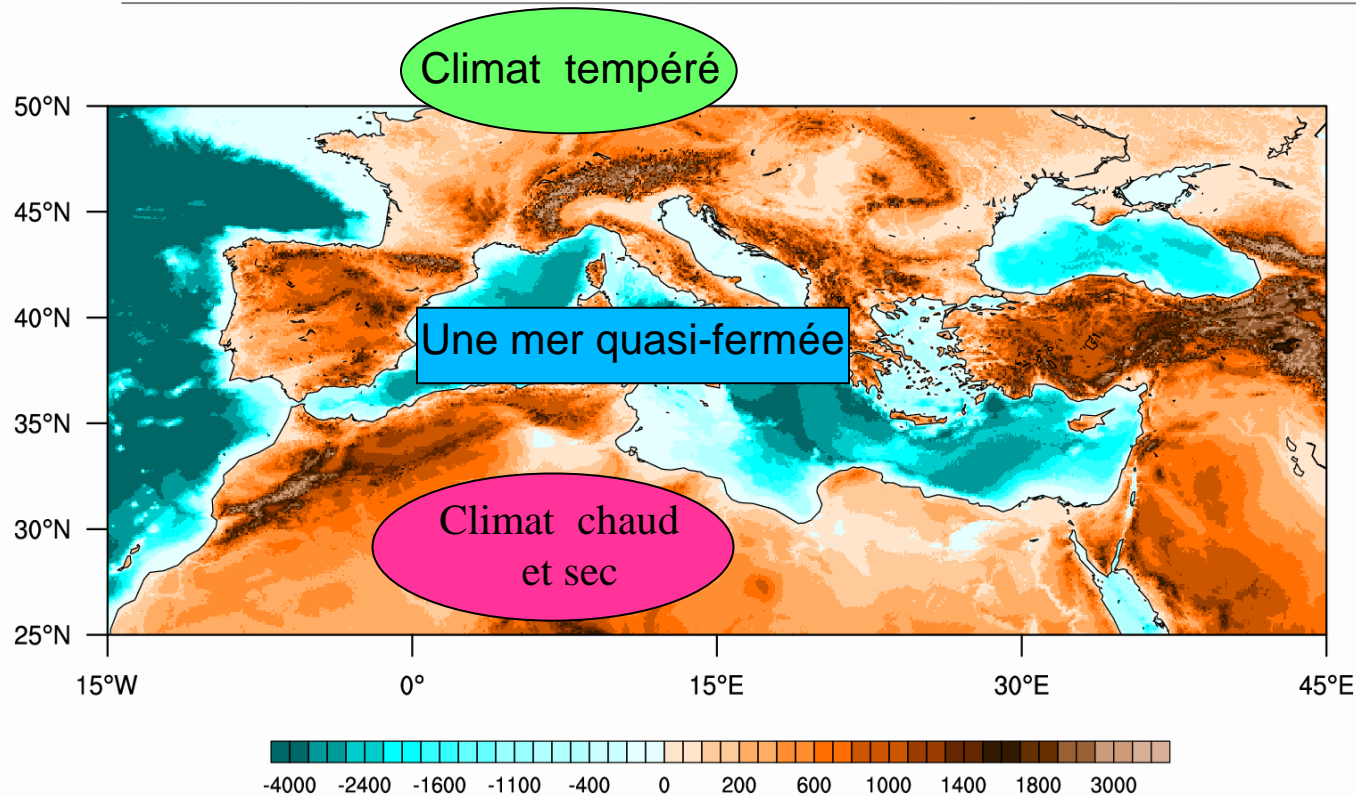
- **Utilisation opérationnelle des réflectivités des radars dans l'analyse de l'humidité**



Les risques hydrométéorologiques en Méditerranée

Contribution Véronique Ducrocq,
Directrice des Opérations de Prévision

La région Méditerranée



- ⇒ Forte variabilité spatiale et temporelle des conditions climatiques, océaniques et hydrologiques
- ⇒ Une région soumise aux risques hydrométéorologiques (pluie intense et crues rapides, sécheresse et feux de forêts, vents locaux forts et submersion marine)
- ⇒ Une des régions au monde les plus sensibles au changement climatique (“hot spot”)

Qu'appelle-t-on épisode méditerranéen ?

Des pluies intenses \Rightarrow des orages

\rightarrow 20 mm en 6 min, 100 mm en 1 heure pour les plus intenses

3 octobre 2015 :
Mandelieu : 115 mm en 1h



Des cumuls de pluie importants en quelques heures

\Rightarrow des systèmes orageux peu mobiles (quasi-stationnaires) qui se régénèrent au dessus de la même région pendant plusieurs heures

\rightarrow 300 mm en 3-6 heures,
> 500 mm en 24 heures pour les plus forts

8-9 septembre 2002 :
683 mm en 24 h



Sur TOUT le pourtour Méditerranéen et le littoral Corse

Gard, 09/2002,
683 mm, 24 h, 24 victimes

Vaison-la-Romaine, 09/1992,
300 mm, 3 à 4 h, 34 victimes

Sur les 30 dernières 30 années,
épisodes répertoriés comme catastrophiques
en termes de pertes humaines et dégâts matériels,
dégâts et vie.
A noter que l'essentiel des pluies est tombé en moins de 12h

Distribution géographique
des épisodes de fortes pluies
>150mm/24h
(1958-2014)

Cannes, 10/2015,
195 mm, 2h, 20 victimes

Nîmes, 10/1988,
420 mm, 6 à 9 h, 11 victimes

Draguignan, 06/2010,
460 mm, 12 à 15 h, 25 victimes

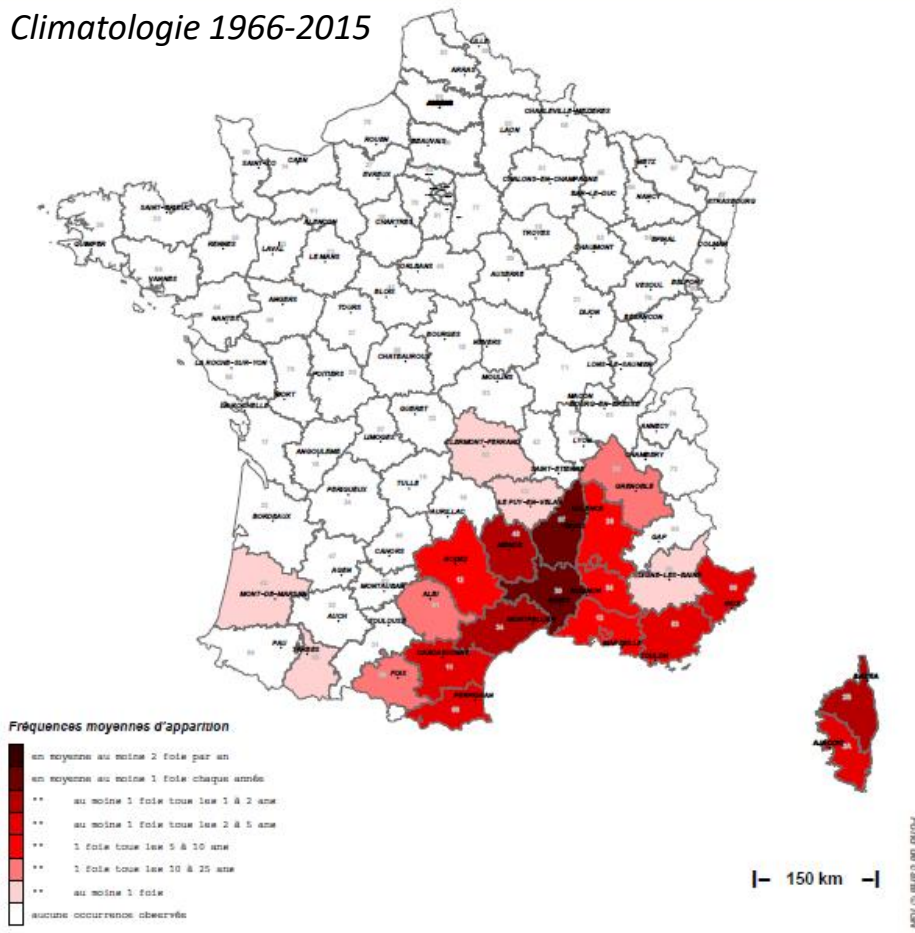
Lézignan-Corbières, 11/1999,
551 mm, 12 h, 26 victimes

Corse, 11/1993,
780 mm, 24 h, 7 victimes

Sur le pourtour Méditerranéen et la Corse

Episodes avec plus de 200 mm en 1 jour

Climatologie 1966-2015



Les départements les plus touchés :

1. Gard, Ardèche

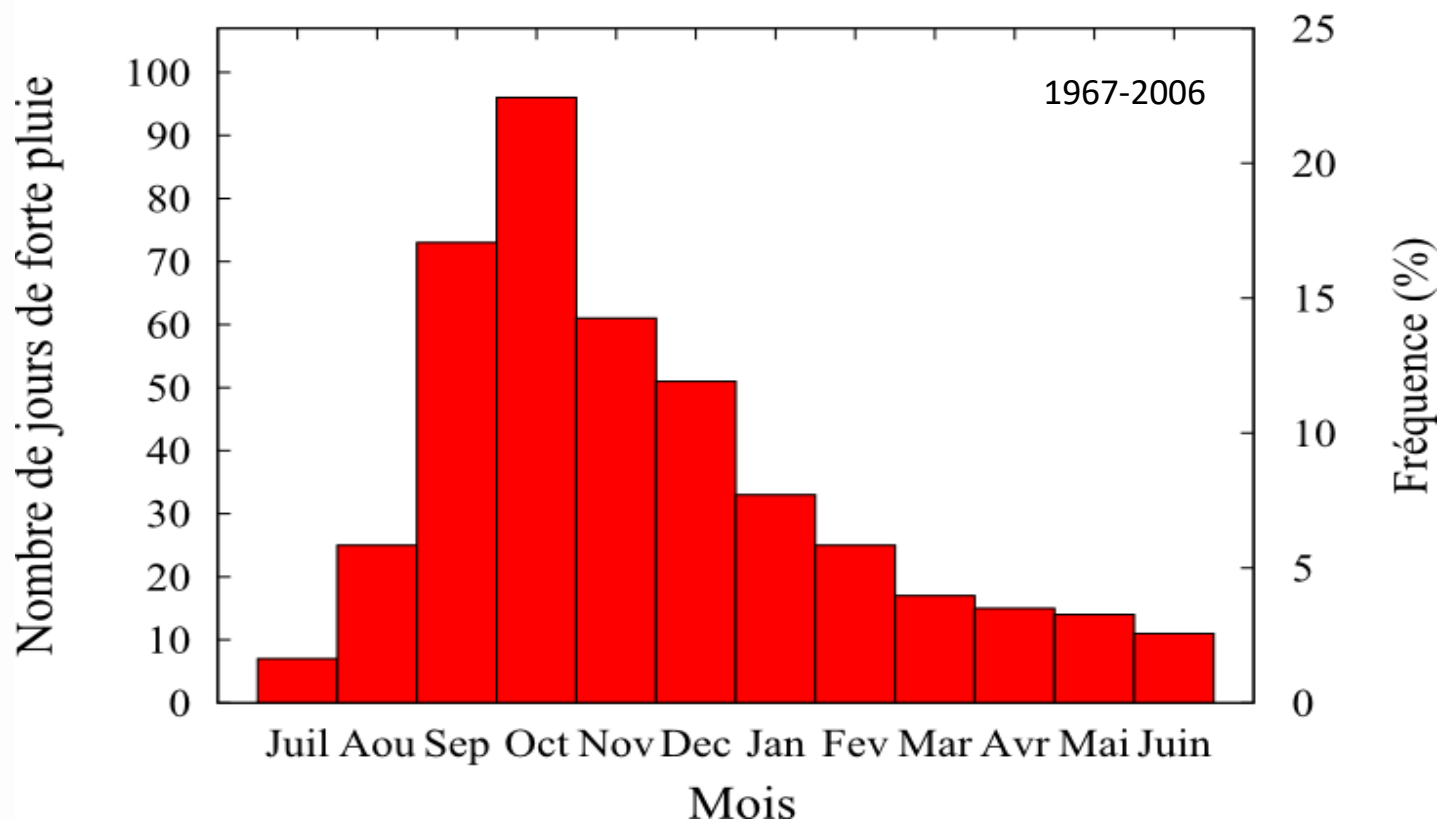
En moyenne, 1 fois par an

2. Hérault, Haute Corse, Lozère

En moyenne, 1 fois tous les 1 à 2 ans

Le plus souvent à l'automne

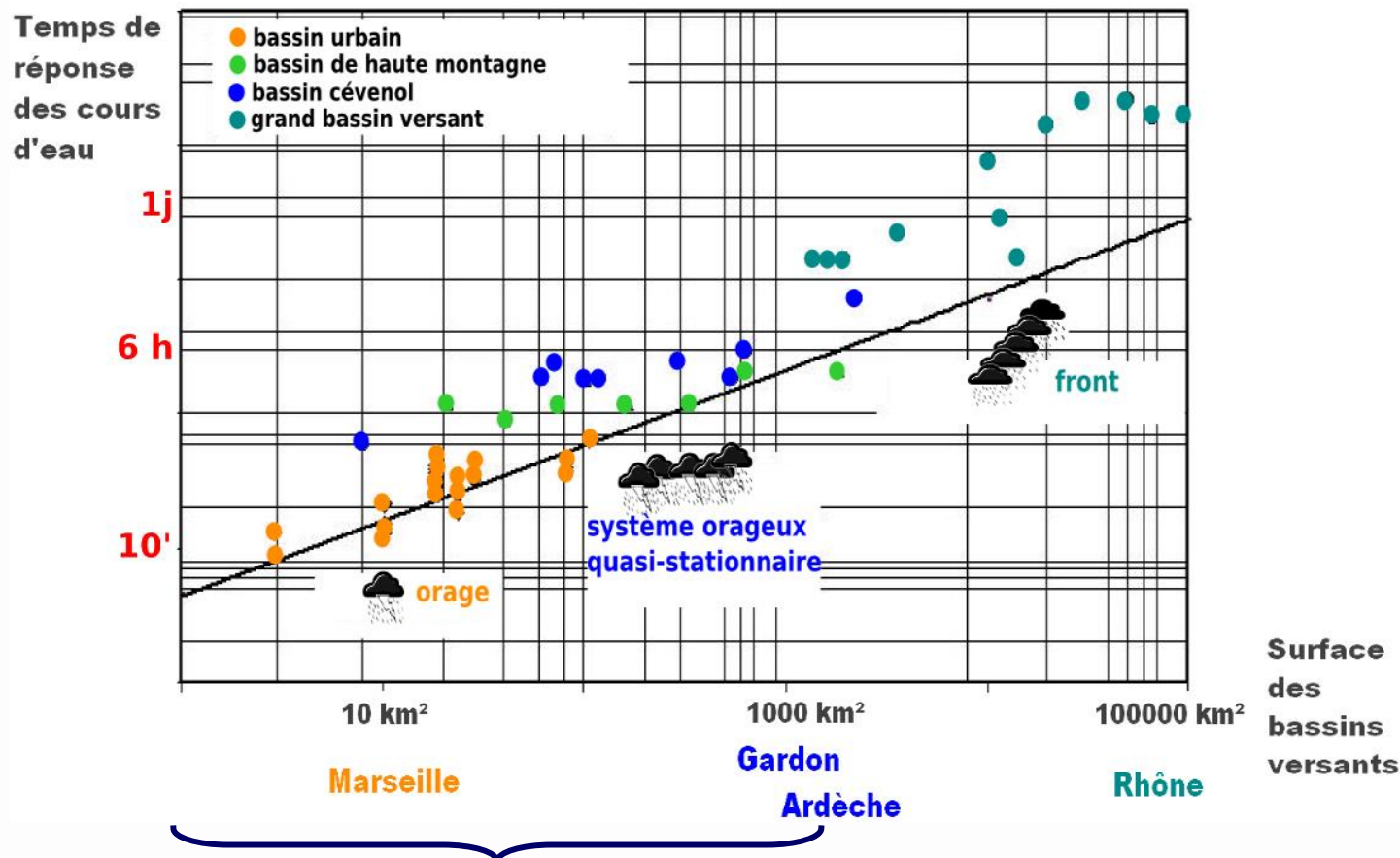
Épisodes avec plus de 150 mm en 1 jour



Mais pas uniquement qu'à l'automne

→ Draguignan, juin 2010

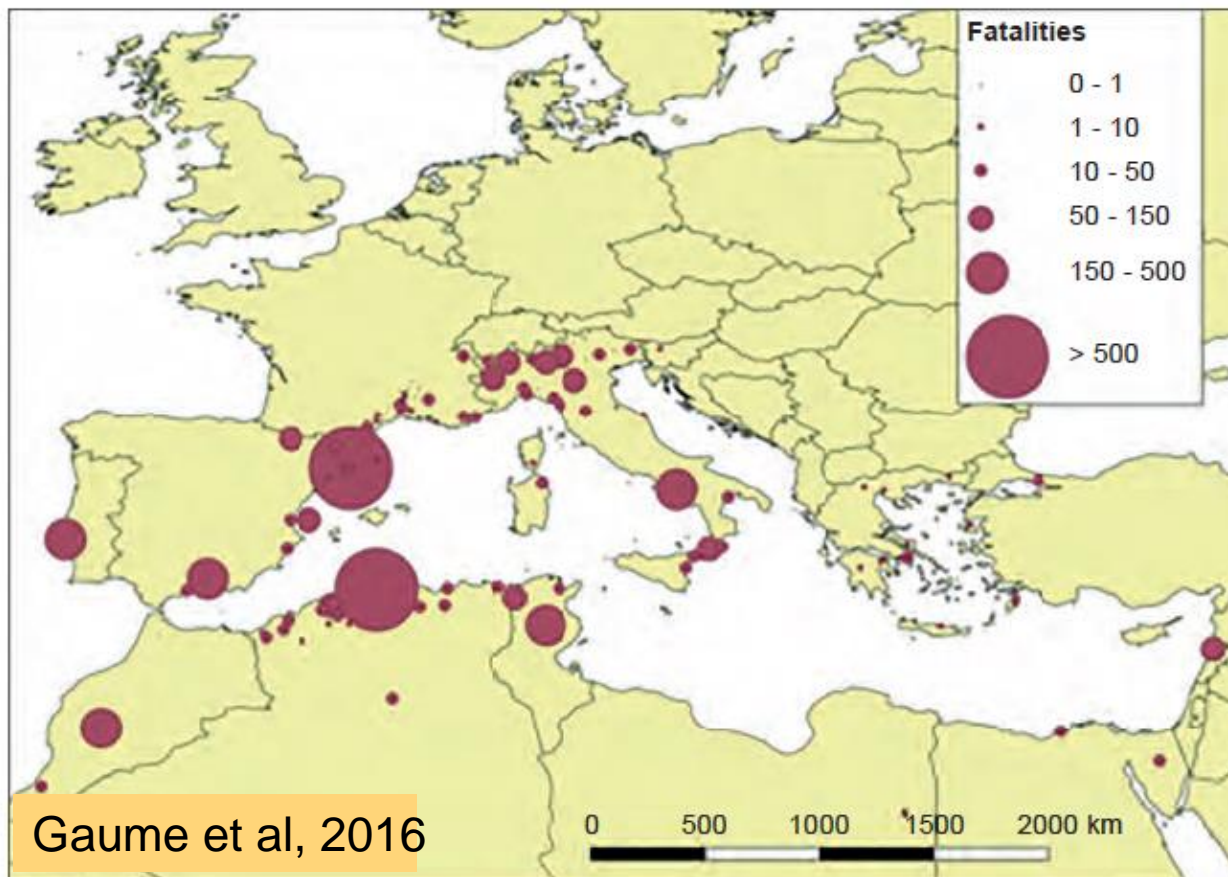
Une montée des eaux très rapide



50% de la superficie totale du bassin méditerranéen

La région Méditerranée est caractérisée par des bassins versants de petite taille, aux pentes prononcées

Un risque qui concerne toute la Méditerranée



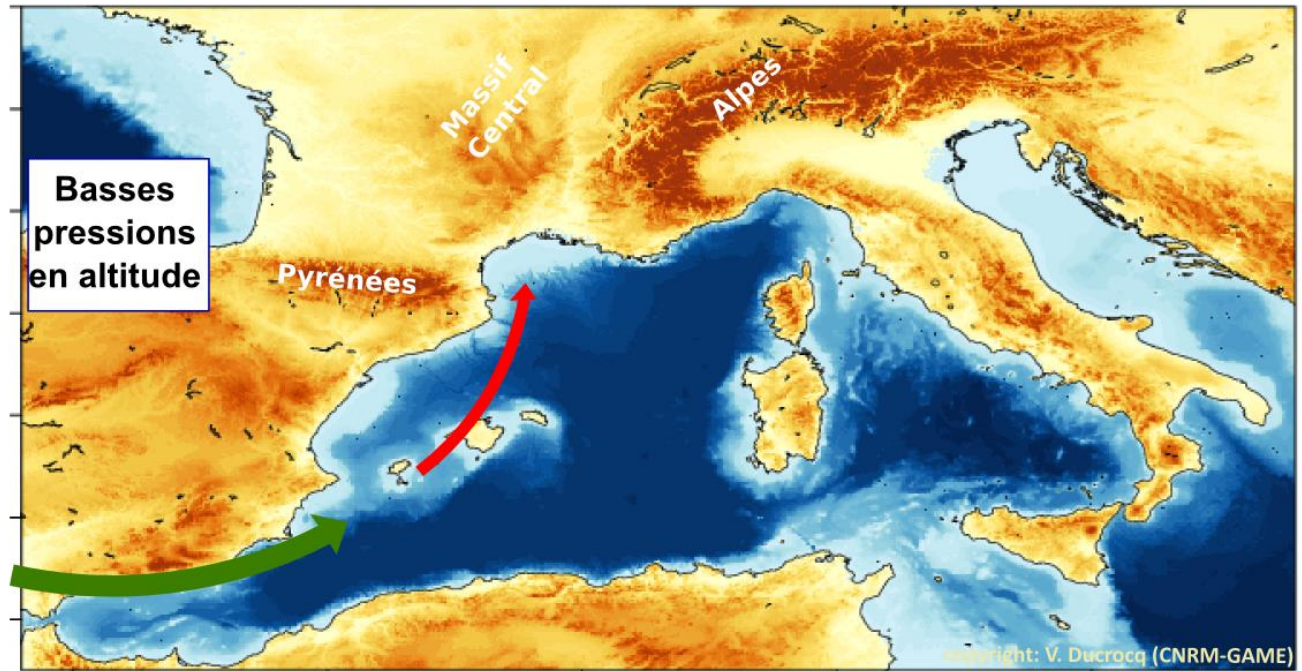
Nombre de victimes pour 172 événements d'inondations documentés entre 1940 et 2015

Et plus particulièrement la Méditerranée occidentale

La situation météorologique à grande échelle

Une circulation à grande échelle propice aux pluies intenses

75% des situations
(Nuissier et al, 2011)



- ➡ vent de basses couches dirigé vers les reliefs du pourtour Méditerranéen
- ➡ rend instable la masse d'air

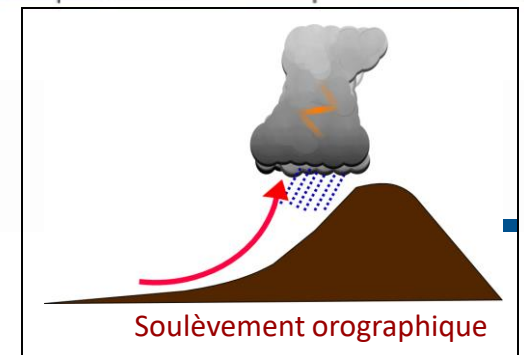
⇒ orages et précipitations intenses

- ➡ Evolution lente de la situation ⇒ des conditions favorables qui perdurent, favorisant la quasi-stationnarité des systèmes orageux

⇒ accumulation de pluie au même endroit pendant plusieurs heures

Différents mécanismes de soulèvement

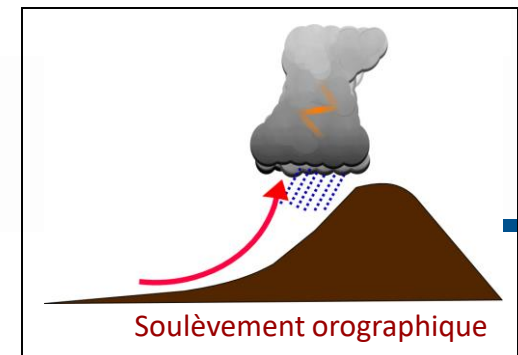
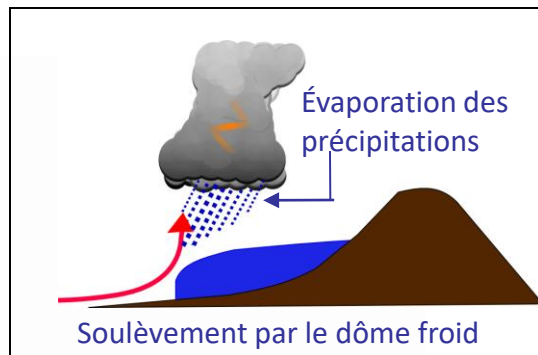
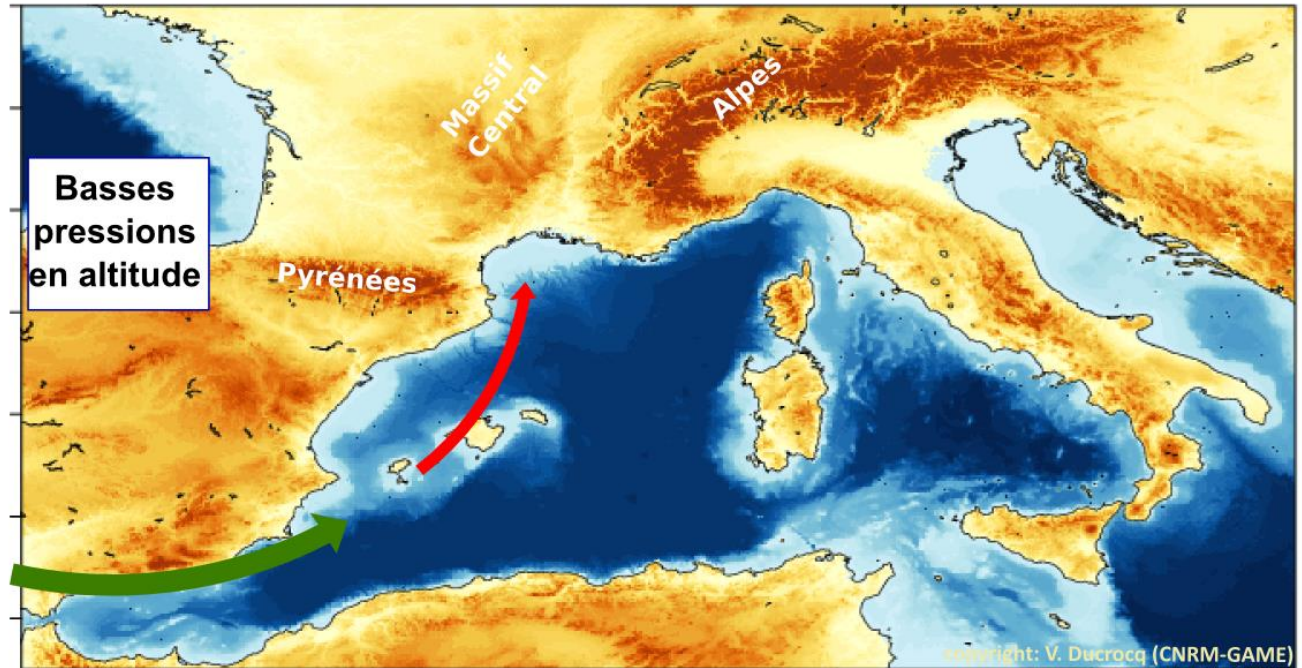
Un flux rapide ou/et très humide est contraint à s'élever lorsqu'il rencontre un relief



Différents mécanismes de soulèvement

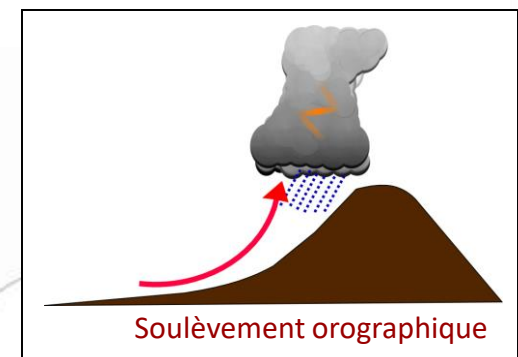
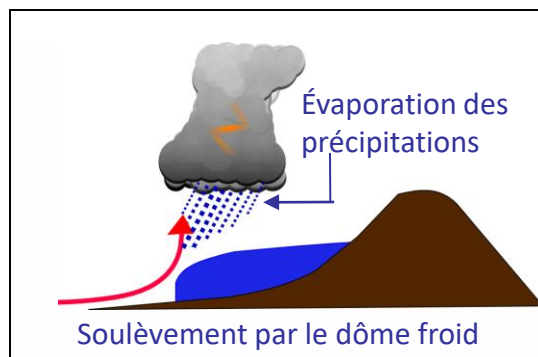
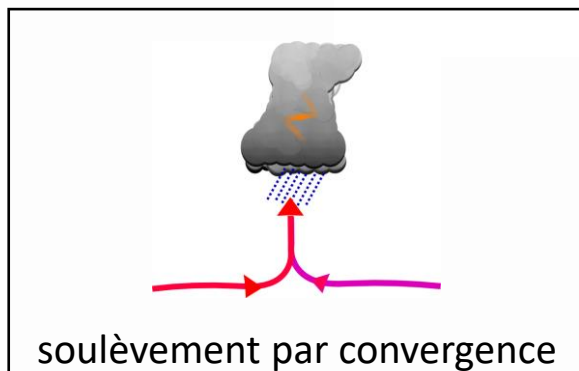
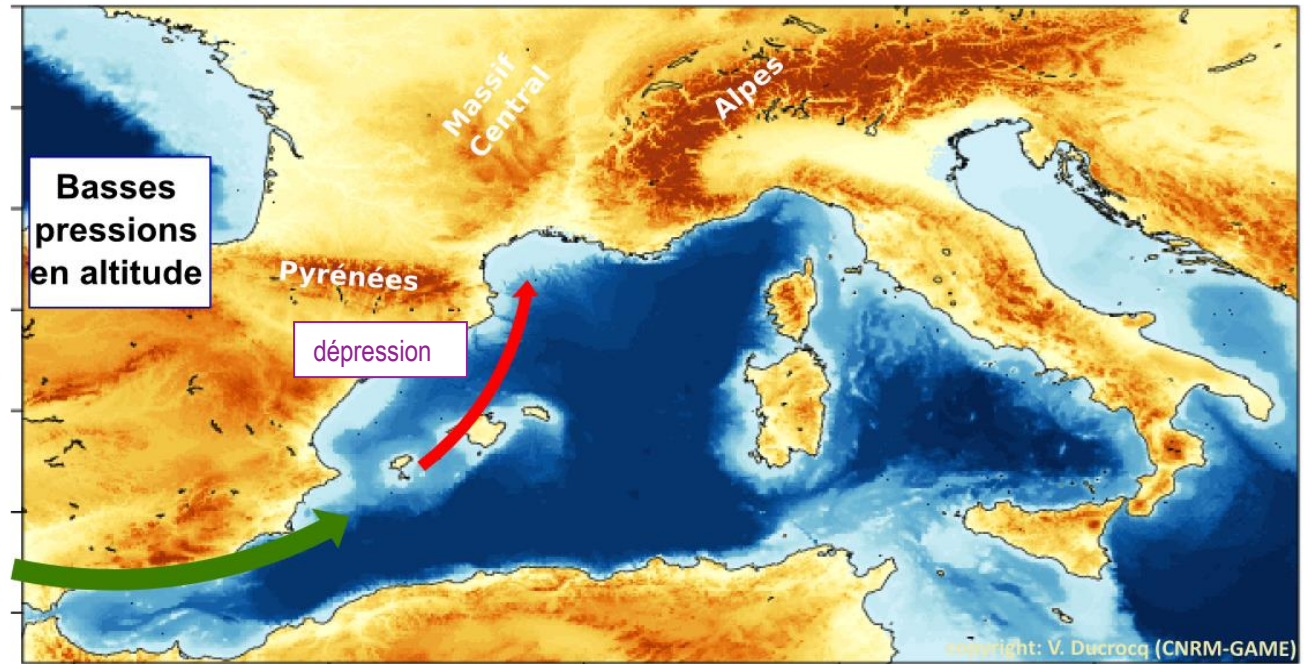
Le système orageux peut auto-entretenir le soulèvement du flux marin

Un vent marin plus lent et/ou un environnement plus sec favorise la formation d'un dôme d'air froid en surface par évaporation des précipitations sous l'orage (Bresson et al, 2012)



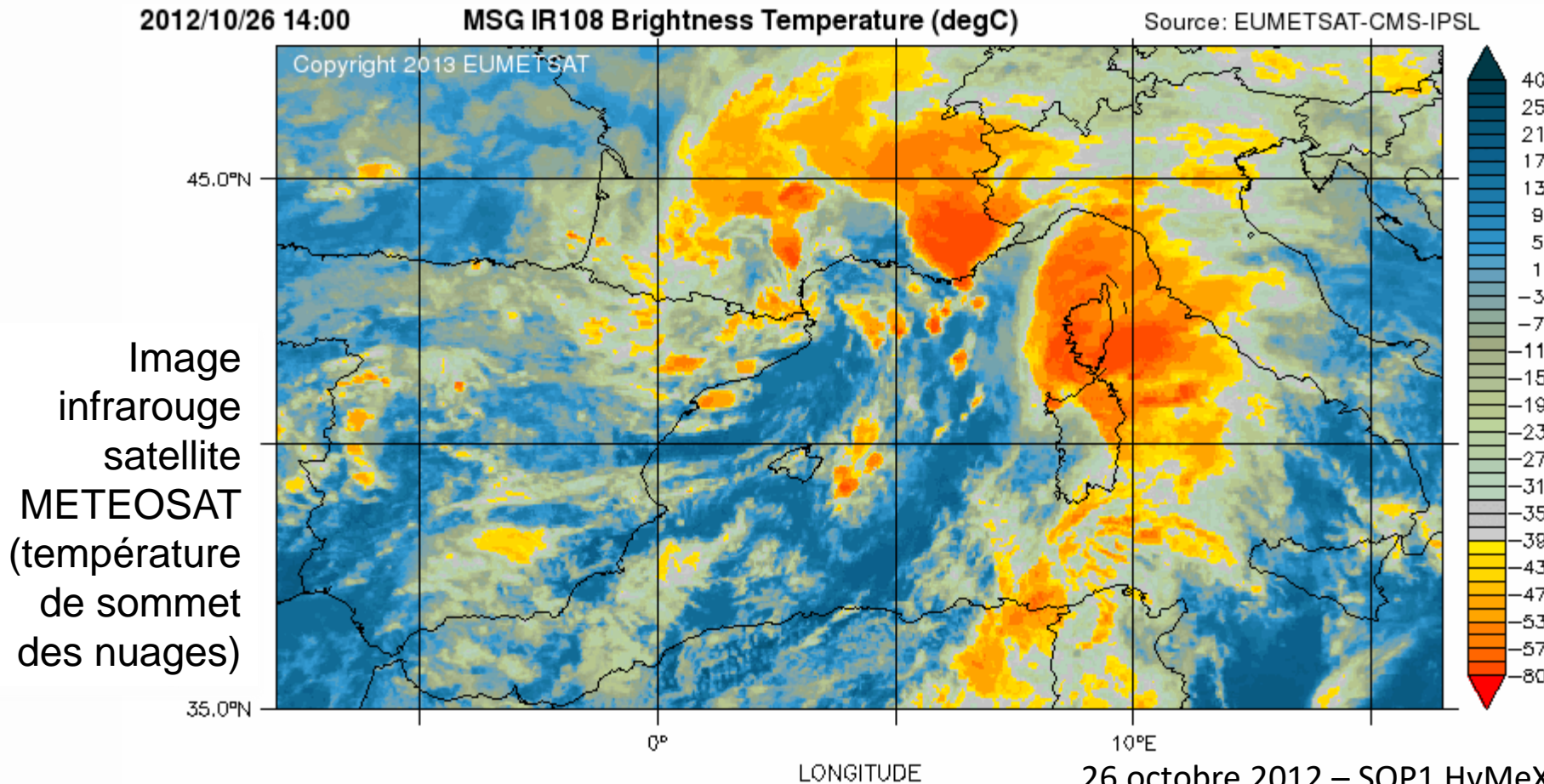
Différents mécanismes de soulèvement

Les reliefs et les îles modifient la circulation en basses couches au dessus de la Méditerranée



Systèmes orageux en “V”

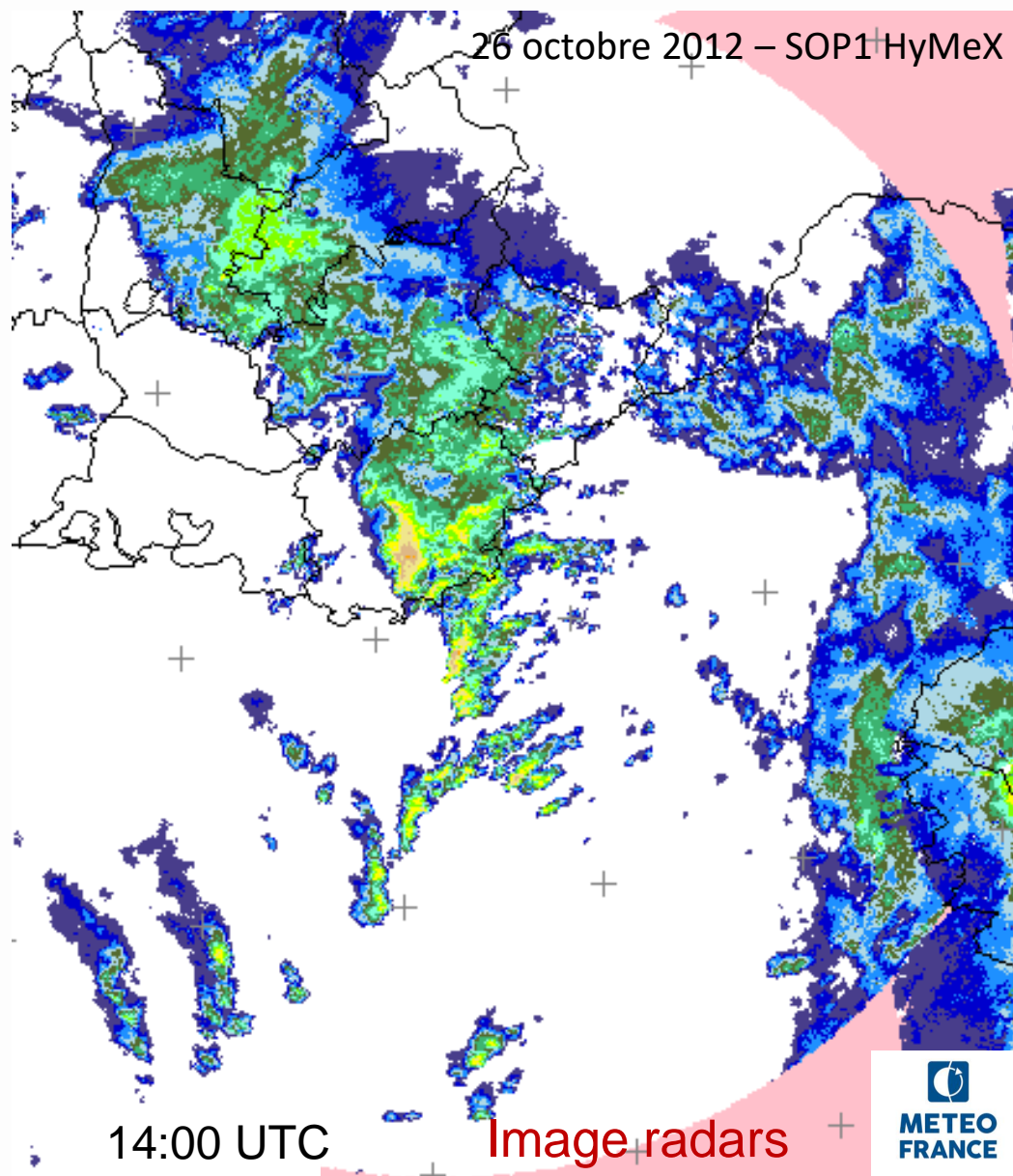
Système multicellulaire (plusieurs Cumulonimbus à différents stades de vie) dont le sommet prend une forme en V



Systèmes orageux “propagatifs”



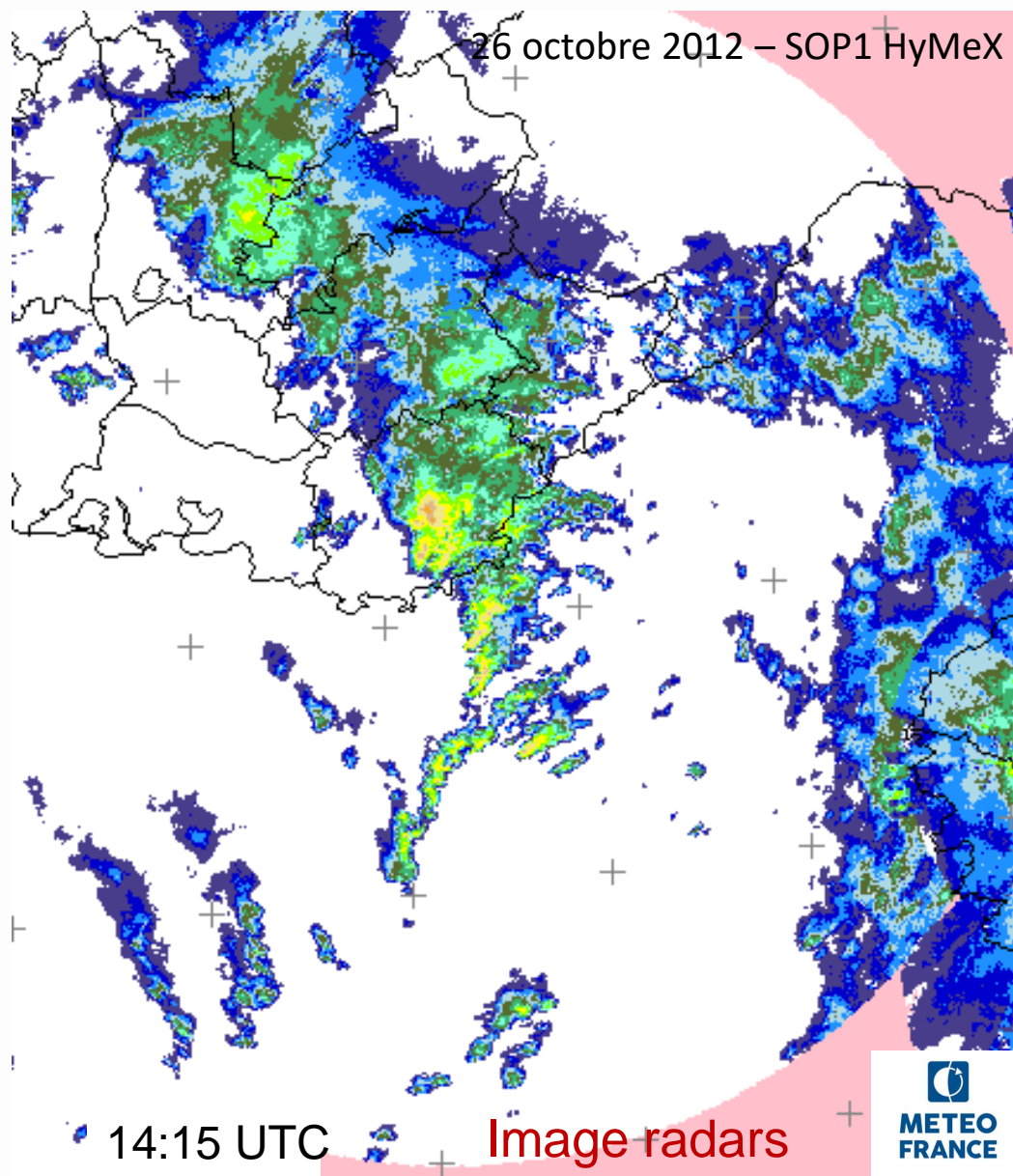
« Train » de cellules orageuses
(initiation, stade mature, dissipation)



Systèmes orageux “propagatifs”



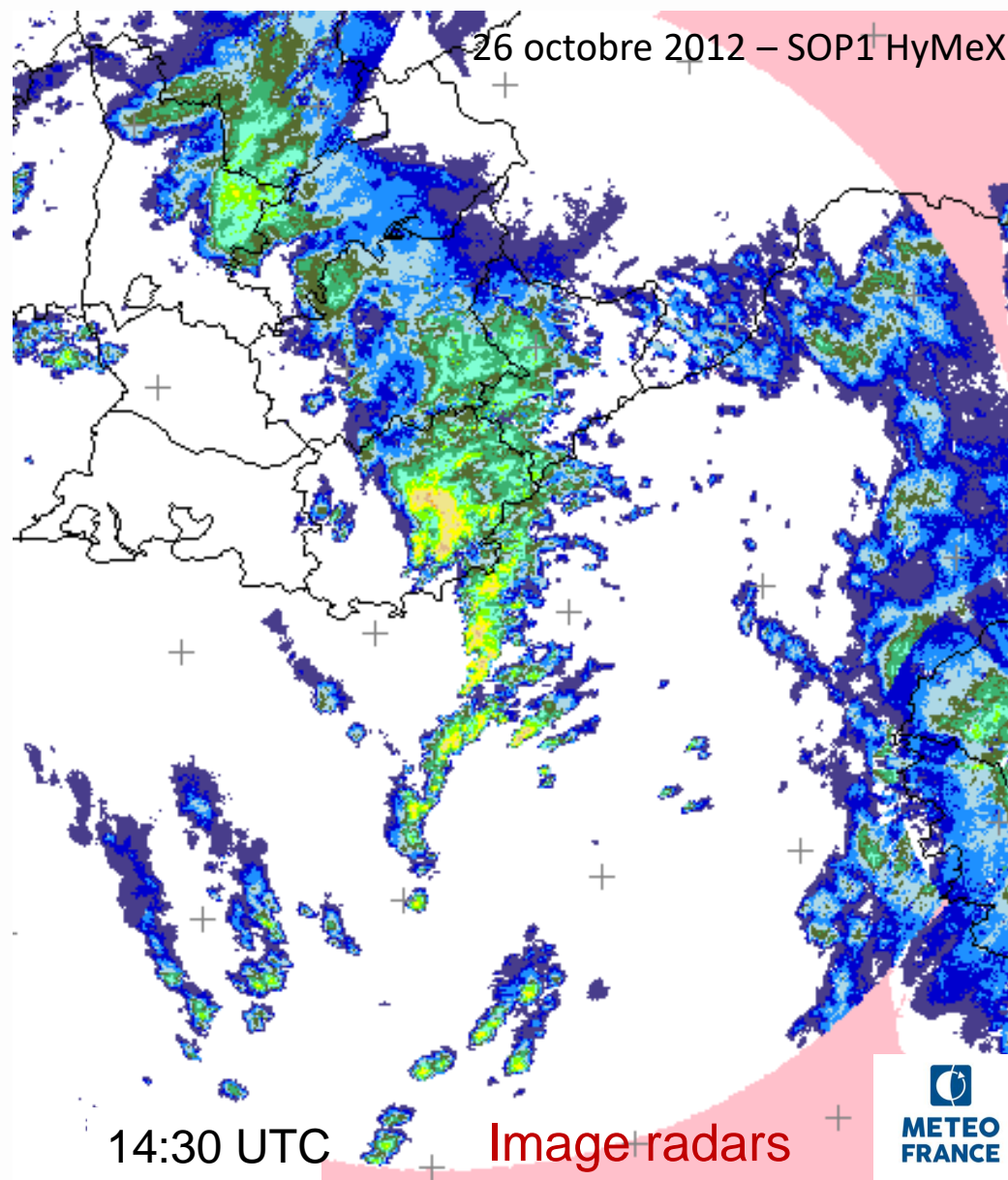
« Train » de cellules orageuses (initiation, stade mature, dissipation)



Systèmes orageux “propagatifs”



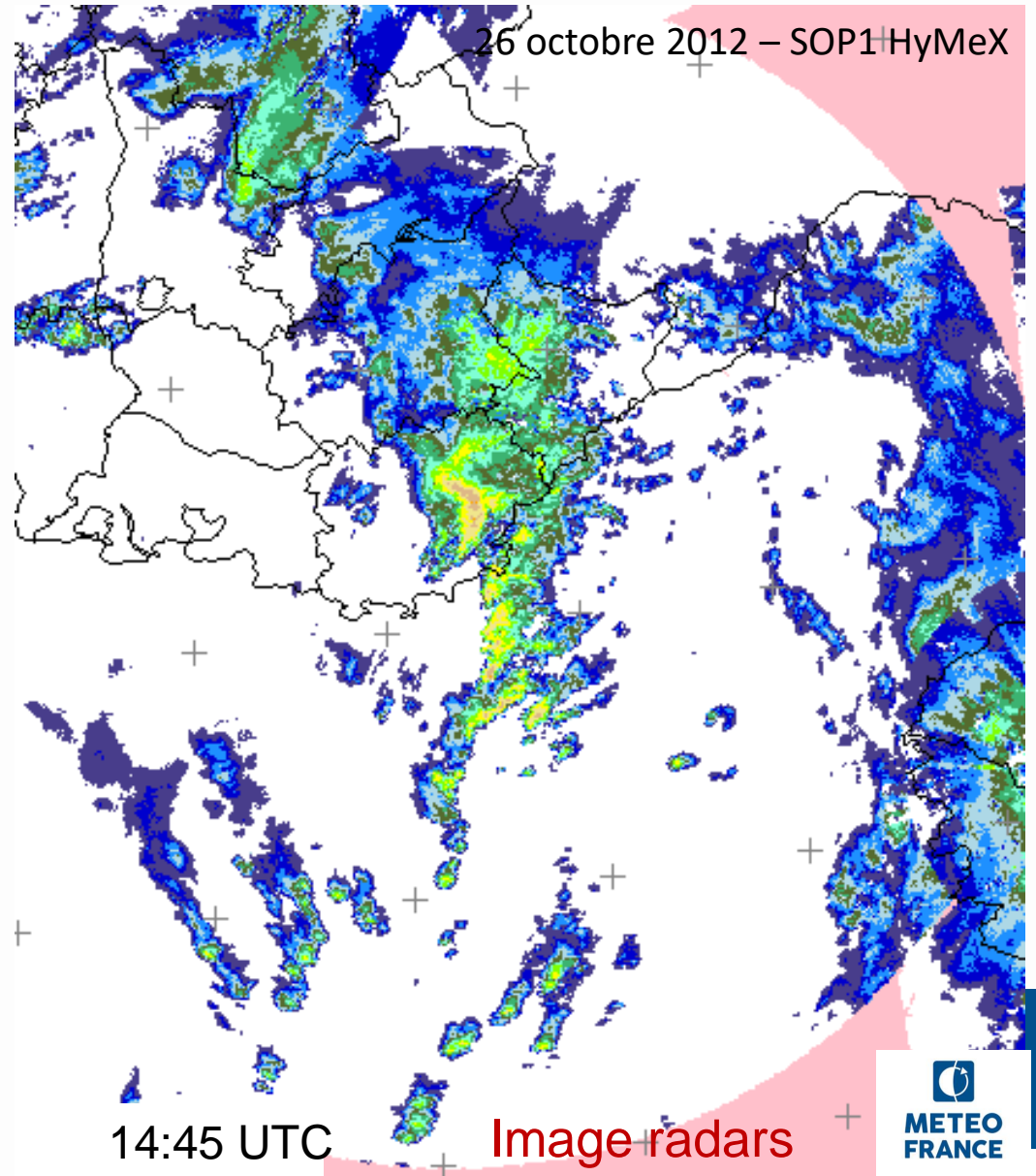
« Train » de cellules orageuses (initiation, stade mature, dissipation)



Systèmes orageux “propagatifs”



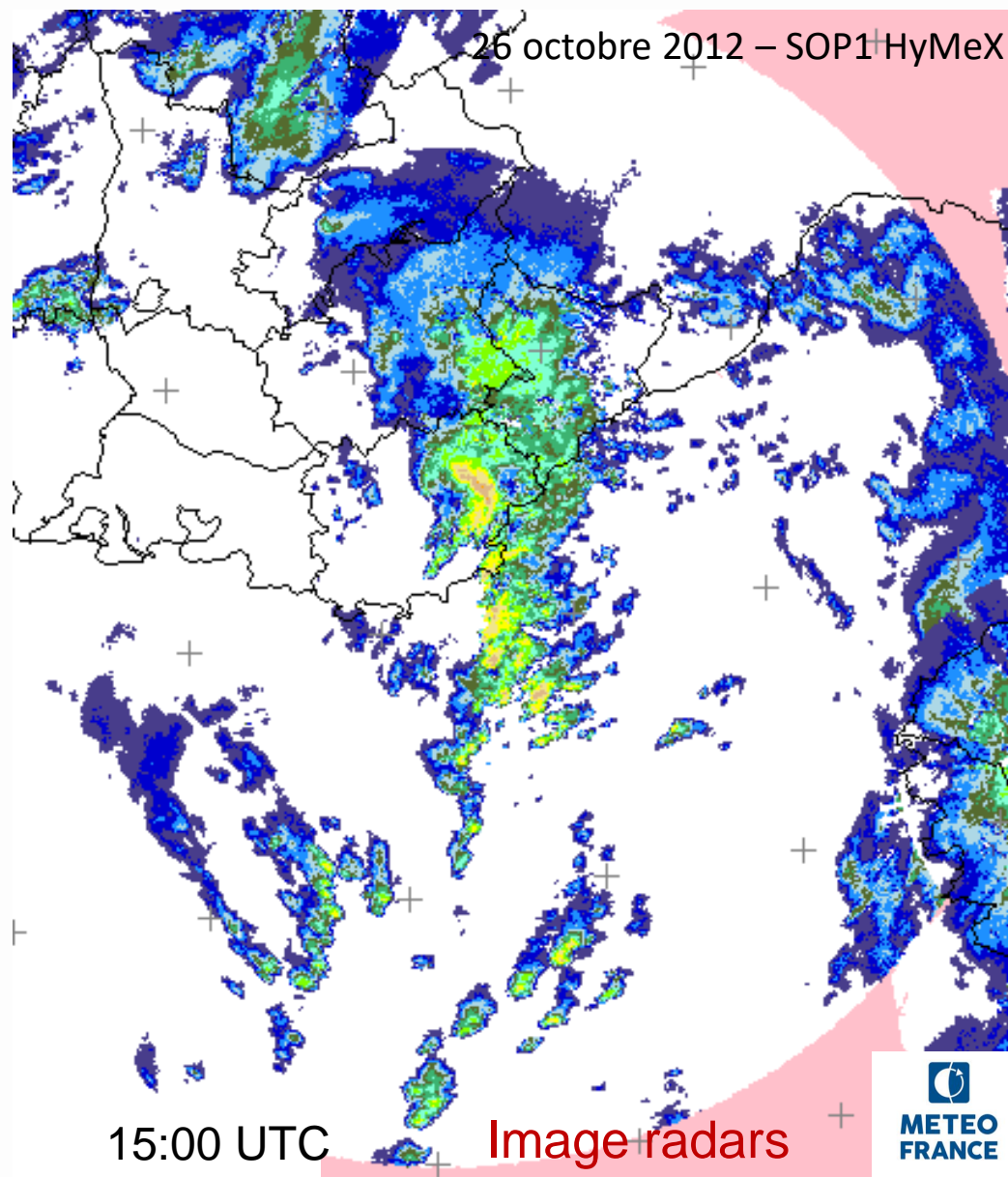
« Train » de cellules orageuses
(initiation, stade mature, dissipation)



Systèmes orageux “propagatifs”



« Train » de cellules orageuses (initiation, stade mature, dissipation)



La situation du 2-3 octobre 2020

La situation météorologique

Dépression très creuse associée à la tempête Alex

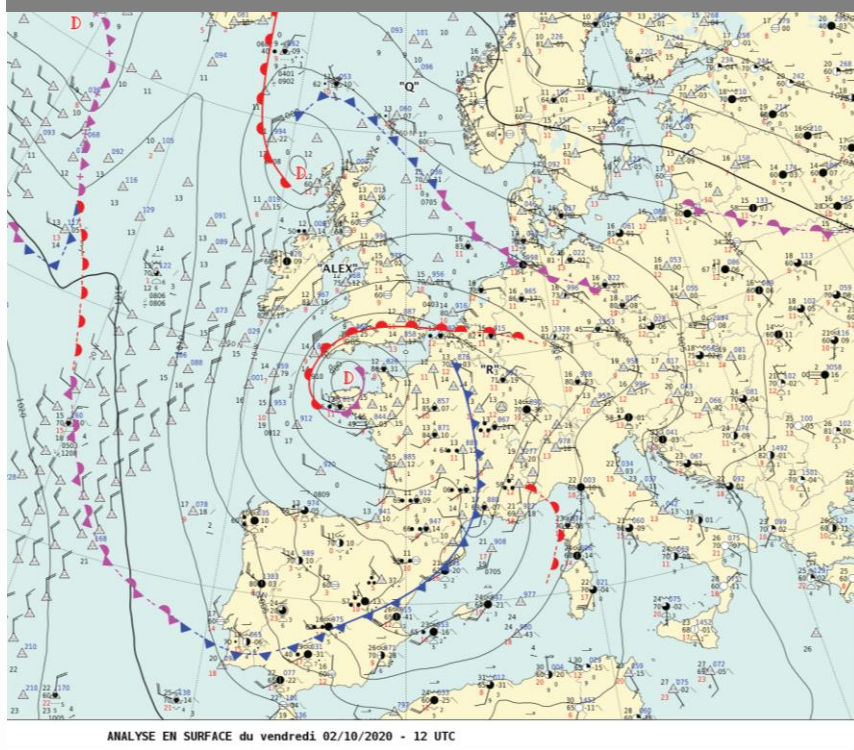
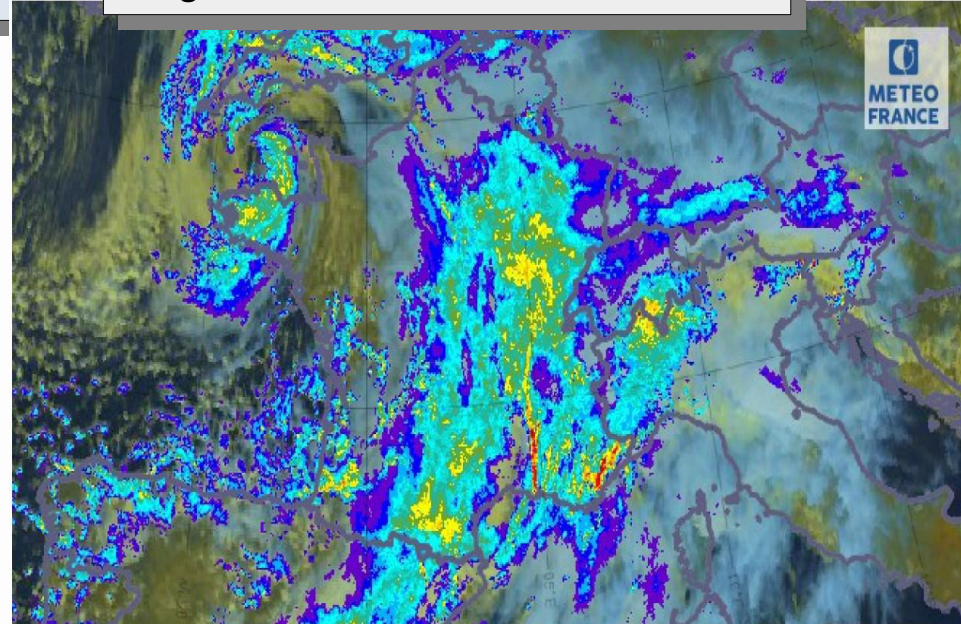


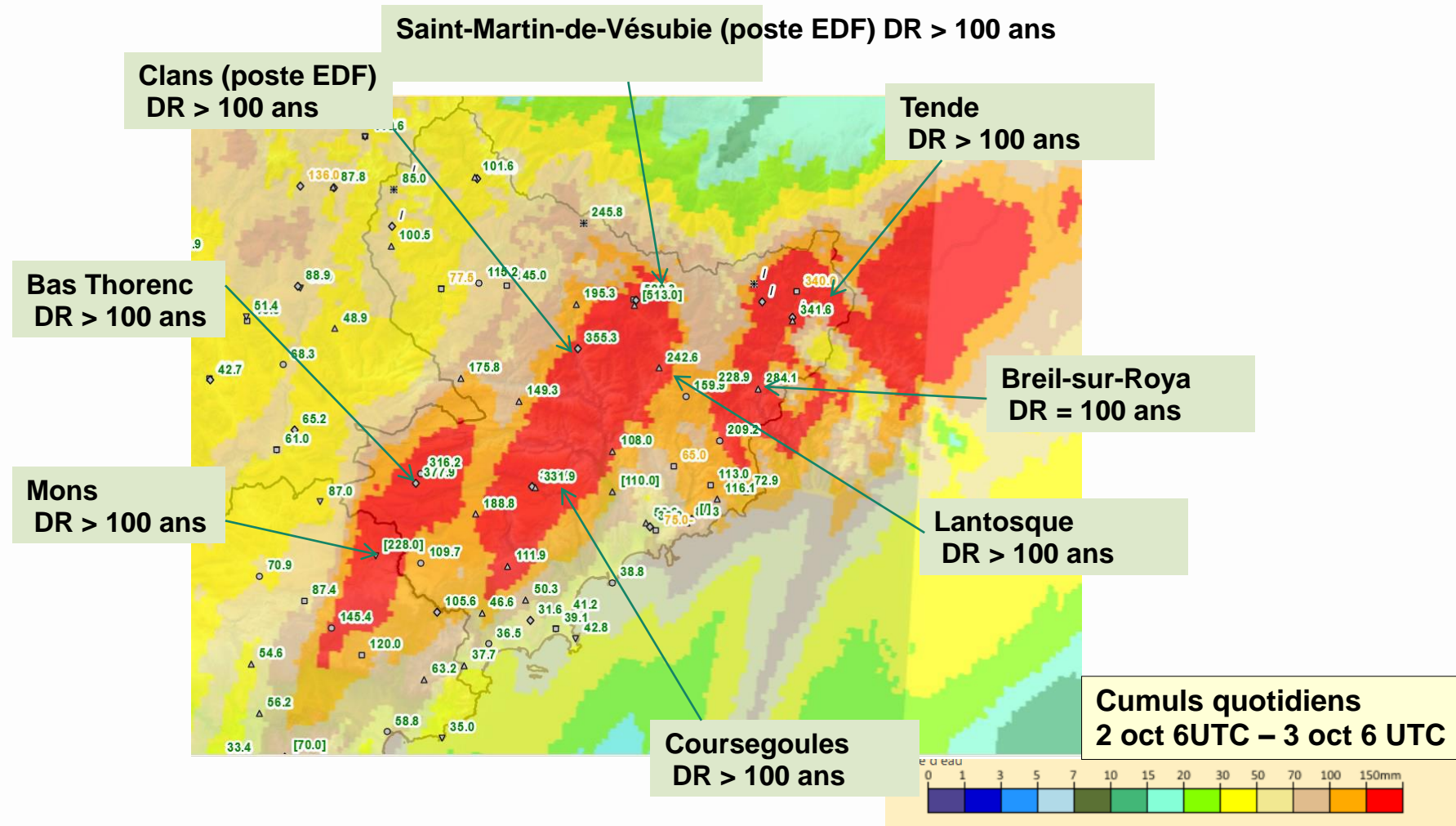
Image satellite visible et réflectivité radar



2 octobre 2020 à 12 UTC

- Un violent coup de vent (tempête Alex), touchant la Bretagne, et moins de 24 heures plus tard, un épisode précipitant exceptionnellement intense sur les Alpes-Maritimes au cours de la journée du 2 et dans la nuit du 2 au 3
- Une dépression extrêmement creuse circule sur le nord-ouest du pays, associée à la tempête "Alex"

Valeurs remarquables d'intensité de précipitation



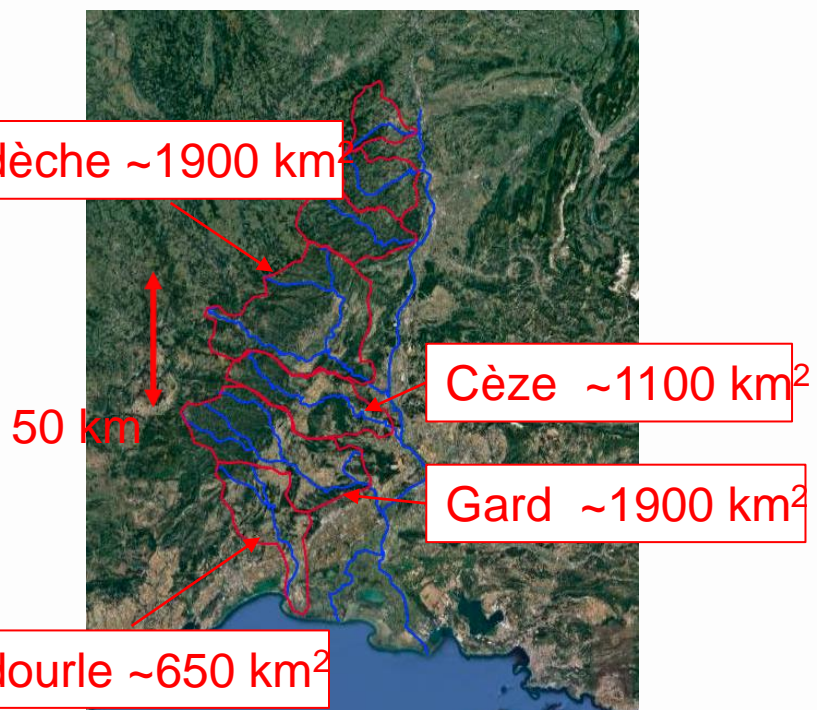
Des cumuls infra-quotidiens exceptionnels aussi (DR \geq 100 ans) :

Saint-Martin-en-Vésubie : 117mm en 2h, 174mm en 3h, 295 mm en 6h, 372 mm en 12h

Coursegoules : 90 mm en 1h, 123mm en 2h, 153mm en 3h, 204 mm en 6h, 310 mm en 12h

DR* : Durée de retour SHIREG ponctuelle

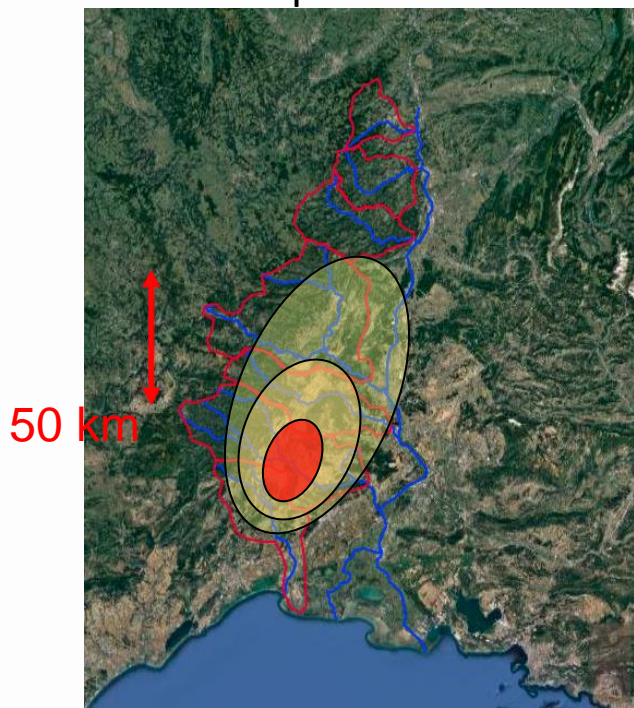
Pourquoi sont-ils difficiles à prévoir ?



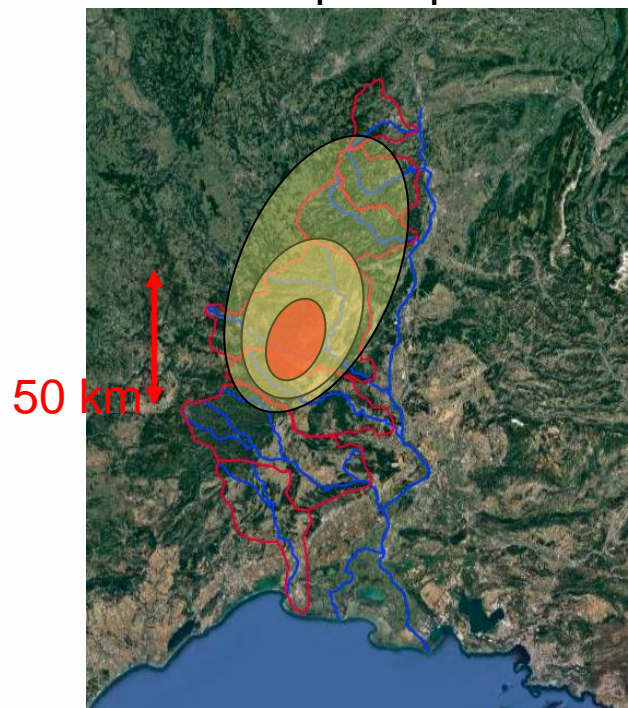
— Bassins versants cévenols

Pourquoi sont-ils difficiles à prévoir ?

Cumuls pluie observés



Cumuls pluie prévus

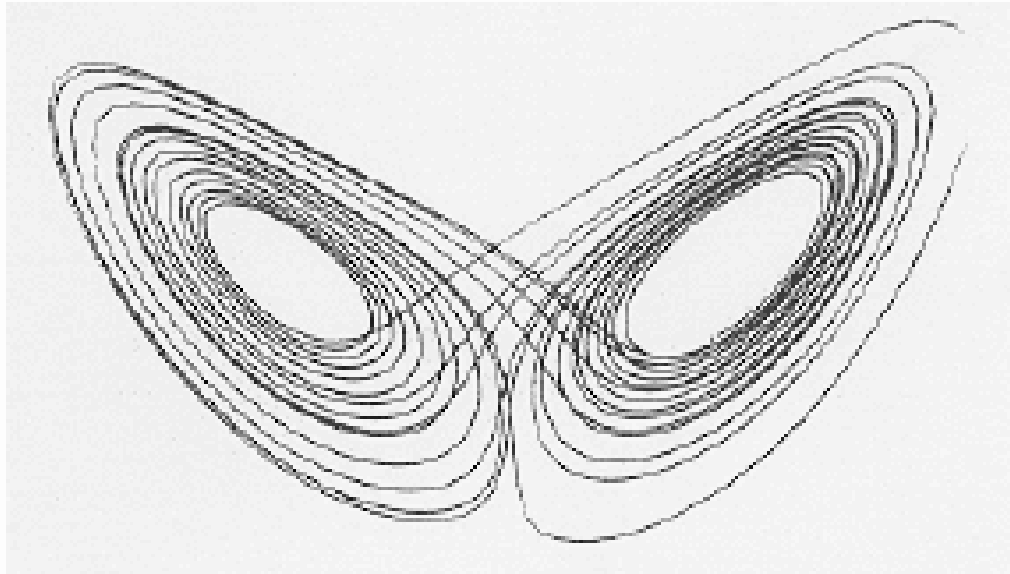


—— Bassins versants cévenols

Erreurs de localisation des systèmes de prévision météorologique les plus performants du même ordre de grandeur que la taille caractéristique des bassins versants méditerranéens

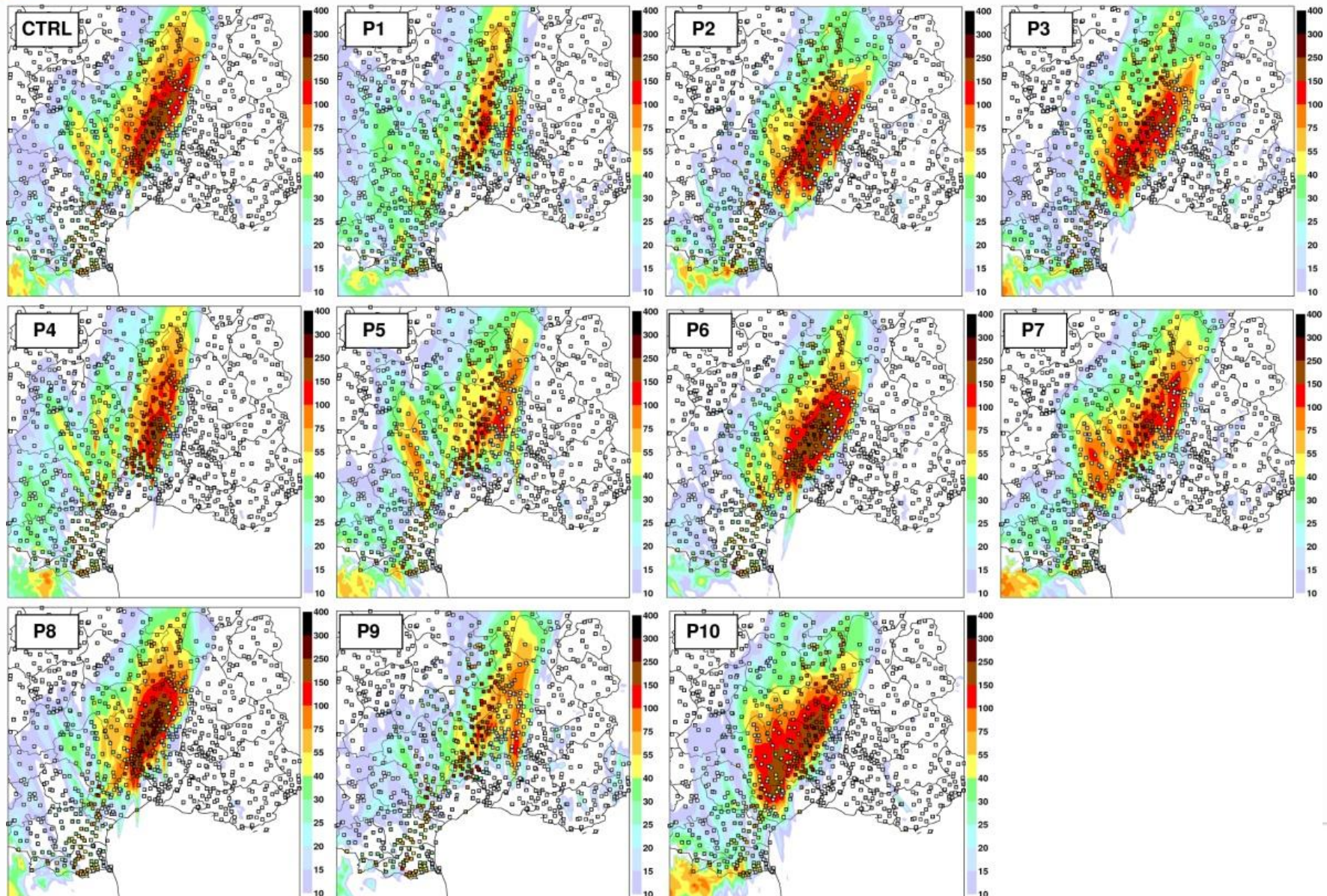
L'atmosphère est chaotique

La sensibilité aux conditions initiales

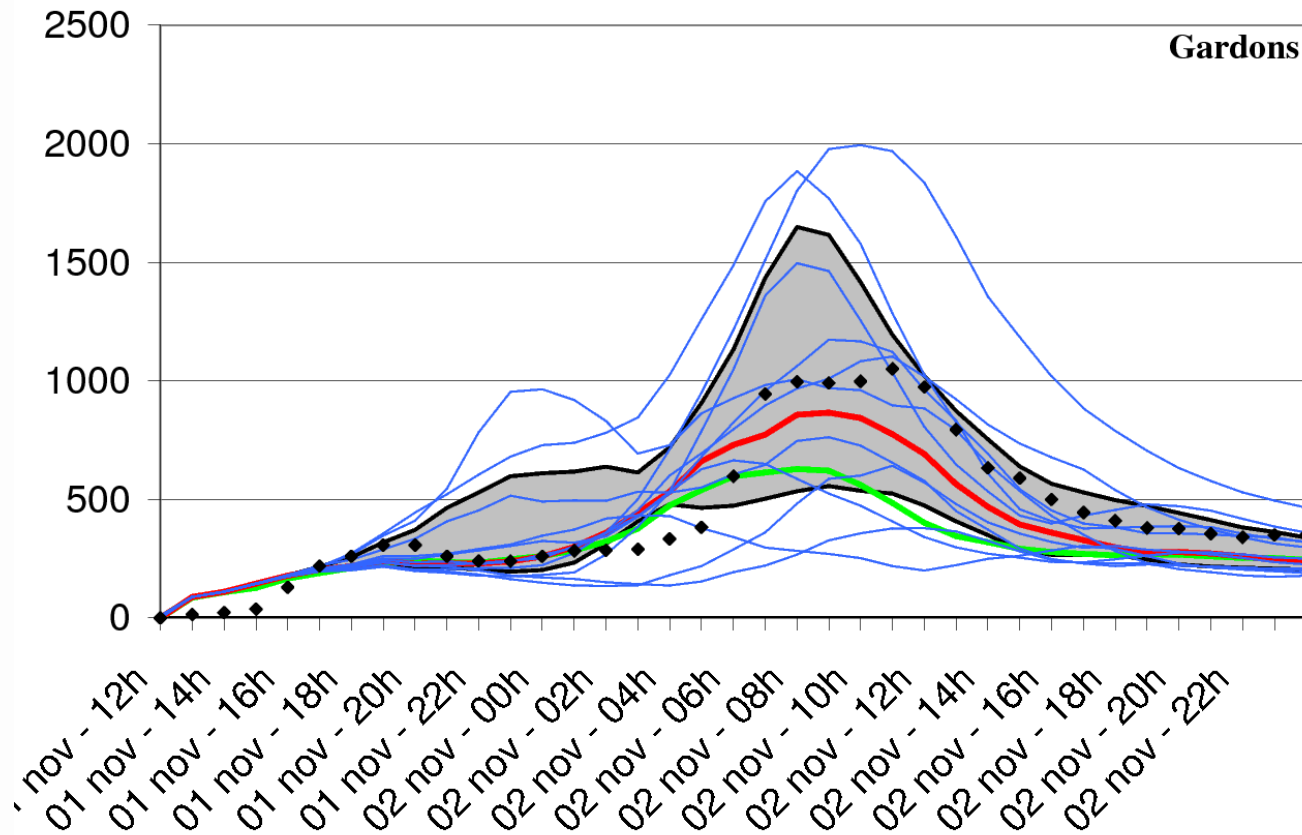


Quelle confiance peut-on avoir dans une seule prévision ?

Prévision d'ensemble



Prévision d'ensemble

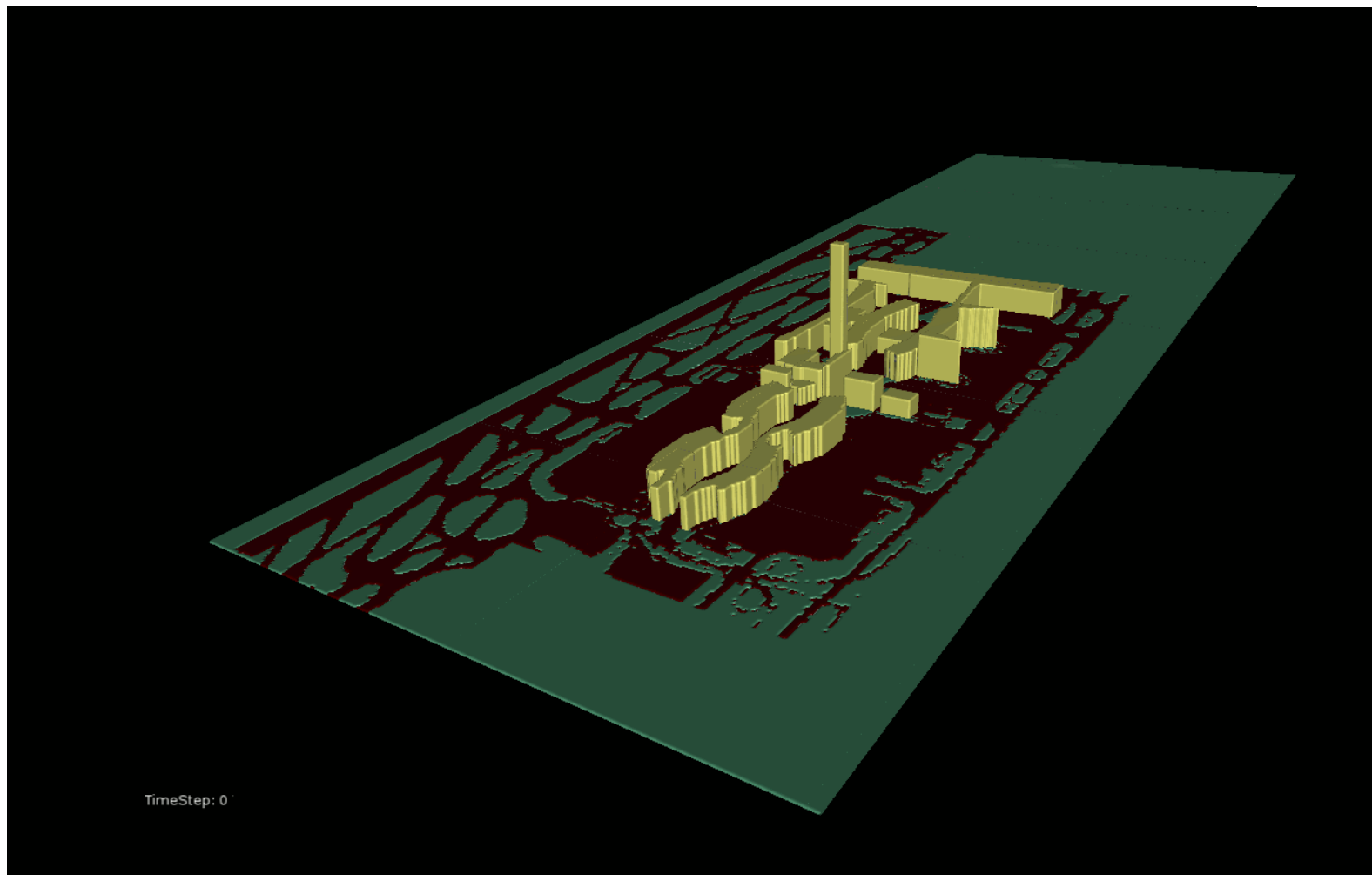


Débits pour le bassin des Gardons (Cévennes) :

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

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 low-hanging clouds. The town features a mix of residential and commercial buildings, green spaces, and a railway line. Overlaid on the bottom left of the image is a white weather map showing isobars (lines of equal pressure) and wind vectors (arrows). The isobars are labeled with values such as 1010, 1015, 1020, 1025, 1030, 1035, and 1040. The wind vectors indicate a flow from the southwest towards the northeast. The background of the slide is a deep blue gradient.

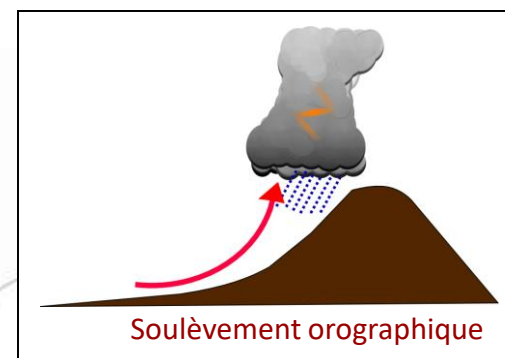
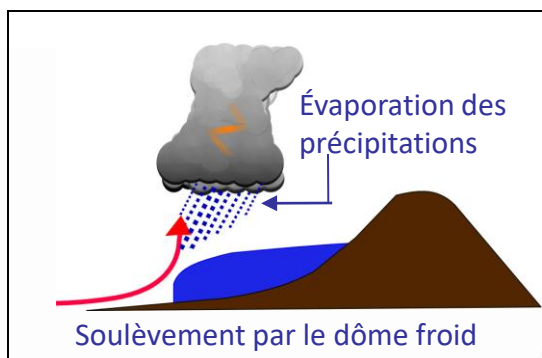
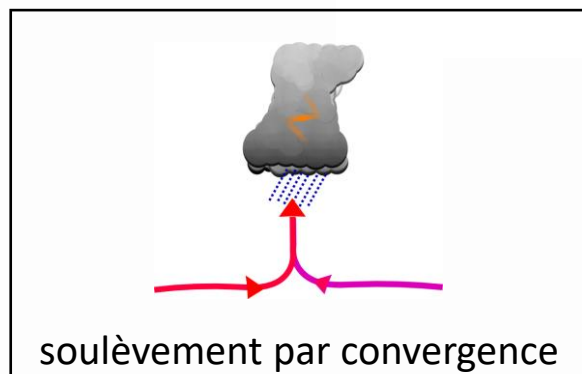
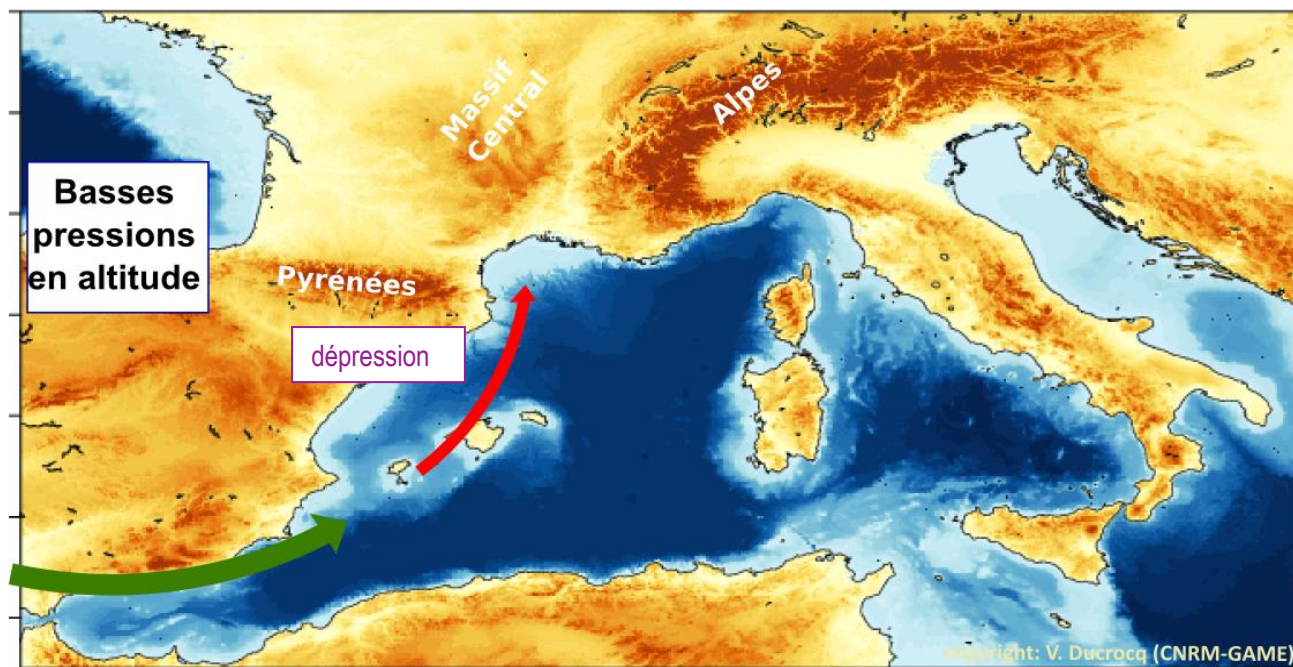
Merci de votre attention



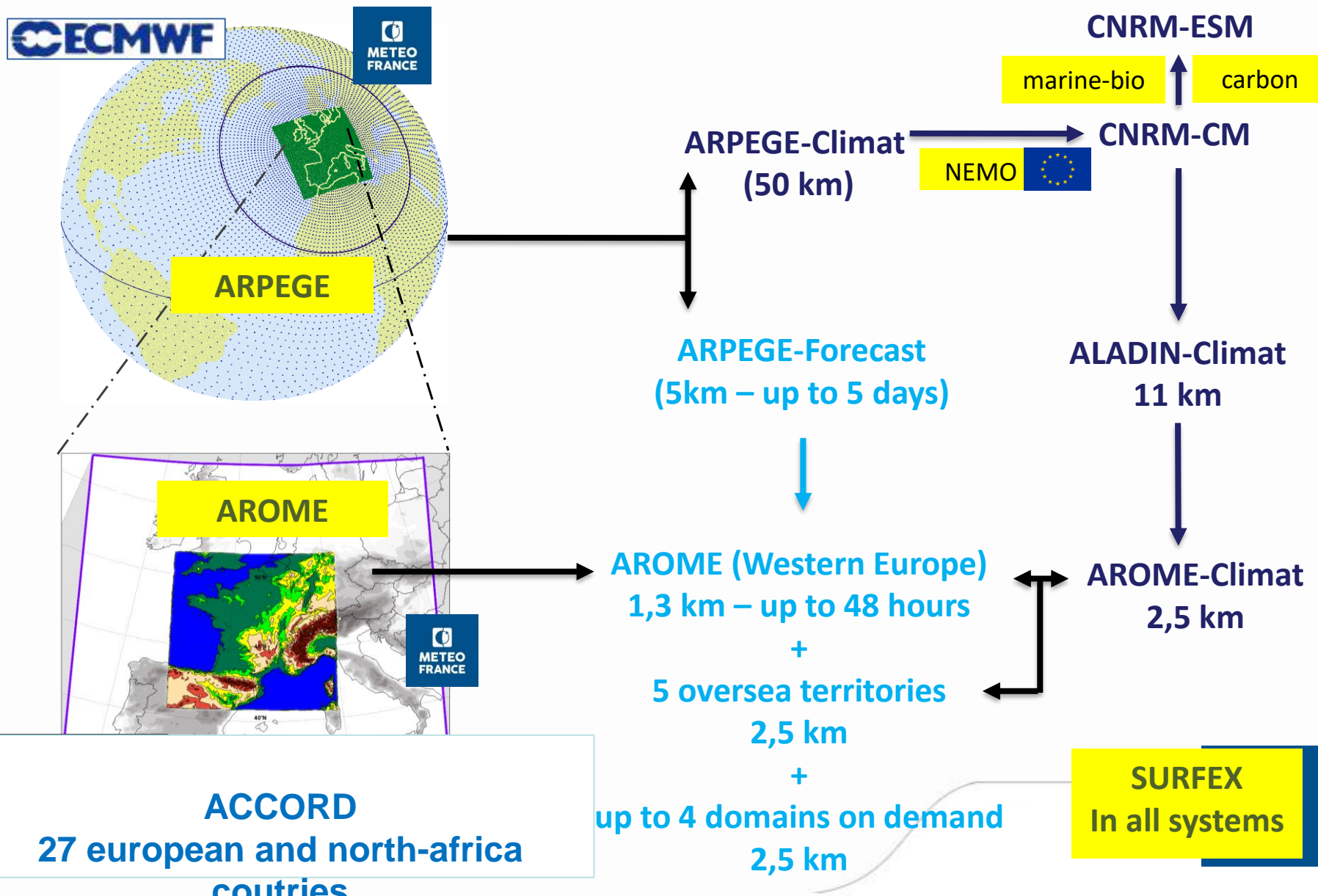
METEO FRANCE

Différents mécanismes de soulèvement

Les 3 mécanismes peuvent être à l'oeuvre en même temps ⇒ Catastrophe de Draguignan en 2010



A single coherent software from weather forecast to climate prediction and a mutualization of efforts at European level



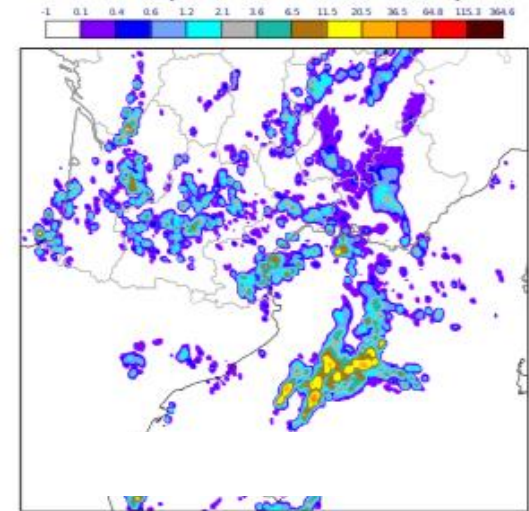
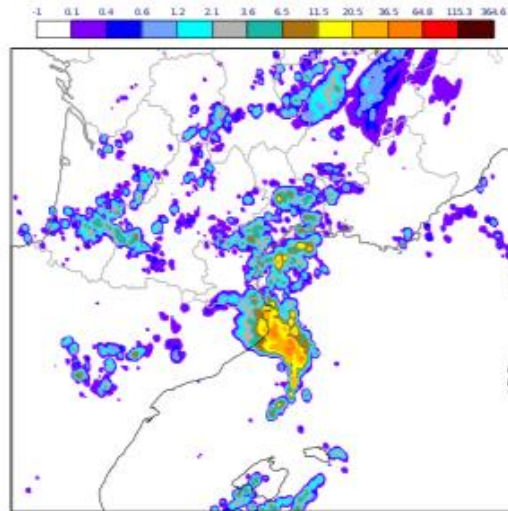
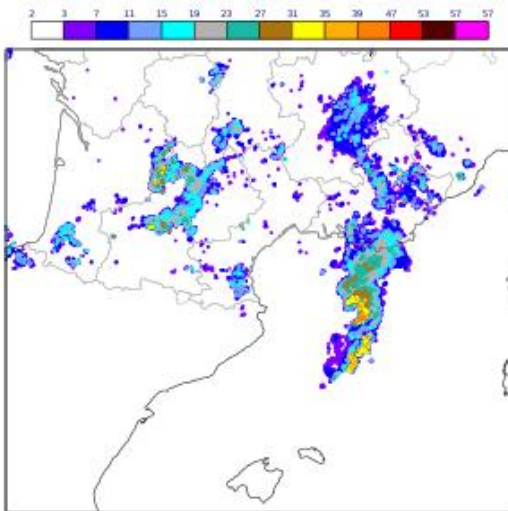
Exemple : amélioration des conditions initiales

Observations

Modèle de prévision AROME de Météo-France

Version opérationnelle
(sans radar espagnol)

avec radars espagnols

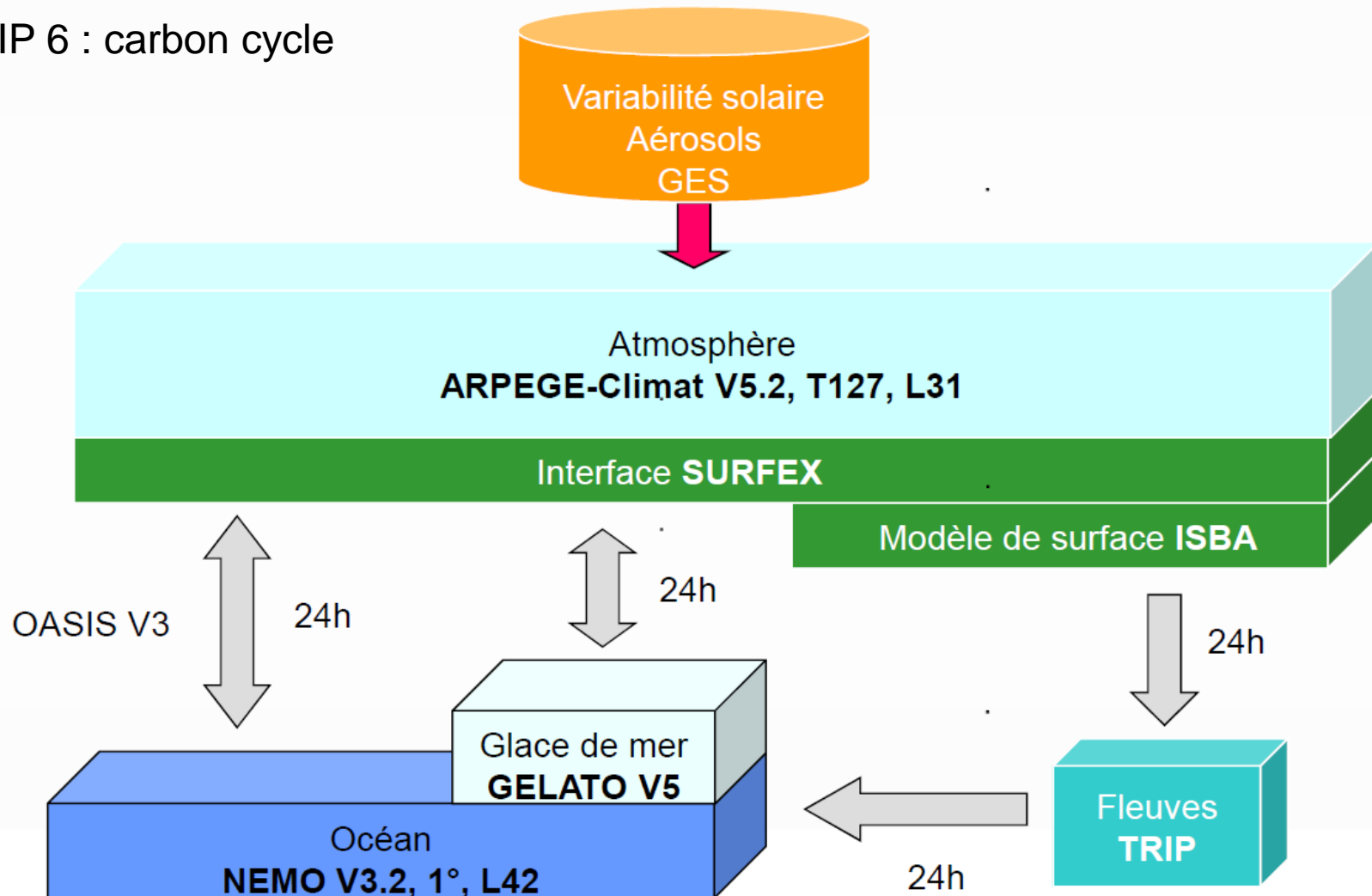


Réflectivités radar le 30/09/2014 à 18 UTC

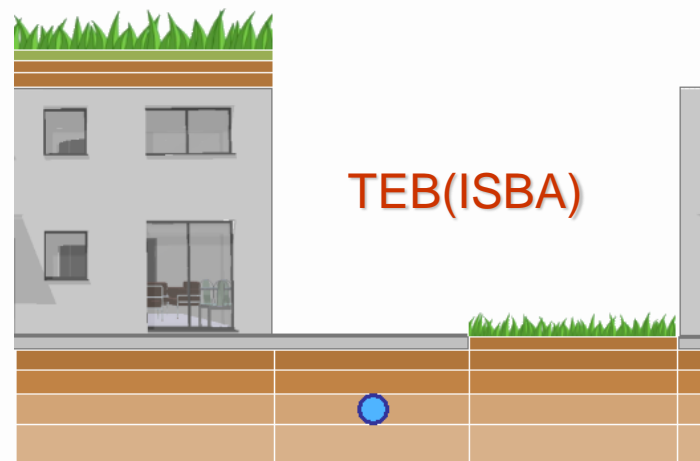
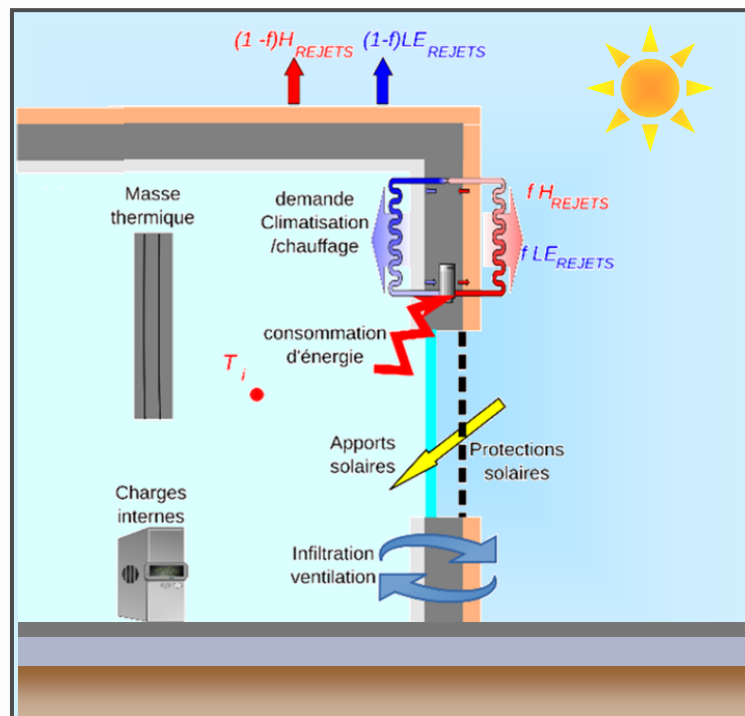
*L'assimilation des données de **12 radars espagnols** améliore la prévision de la **localisation** des précipitations*

Modèle de climat et système Terre

CMIP 6 : carbon cycle

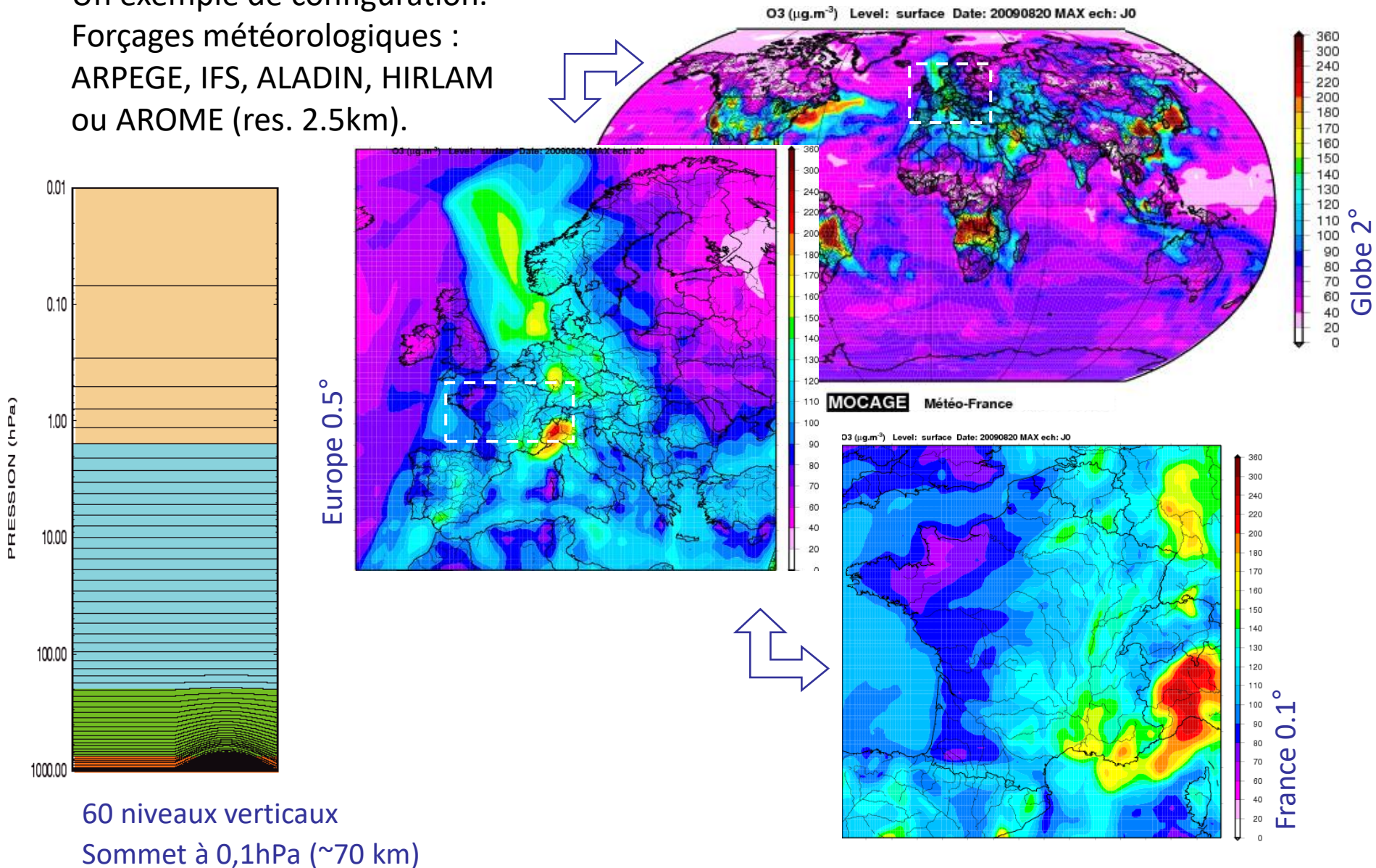


Zoom sur la ville



MOCAGE : la chimie atmosphérique à multi-échelles

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



Principes et équations

Principe Fondamental de la Dynamique : (Newton 1642-1727)

Mécanique des Fluides : Euler (1707-1783), Saint-Venant (1797-1886), Navier (1785-1836), Stokes (1819-1903)

Force de Coriolis (1792-1843) : rotation de la Terre

⇒ **Equations du mouvement** : l'évolution temporelle du vent (c'est-à-dire l'accélération instantanée) u, v, w qui dépend de la pression (P), de la masse volumique (ρ), de la gravité et de la rotation de la Terre

La Conservation de la Masse : « le principe zéro »

⇒ **Equation de la masse volumique** (ρ) dépend de u, v, w

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

⇒ **Equation de la Temperature** (T) dépend de u, v, w , P and ρ

Hypothèse des Gaz Parfaits: Clapeyron (1834)

⇒ **Relation diagnostique entre P , T et ρ**

Challenges : codes and storage

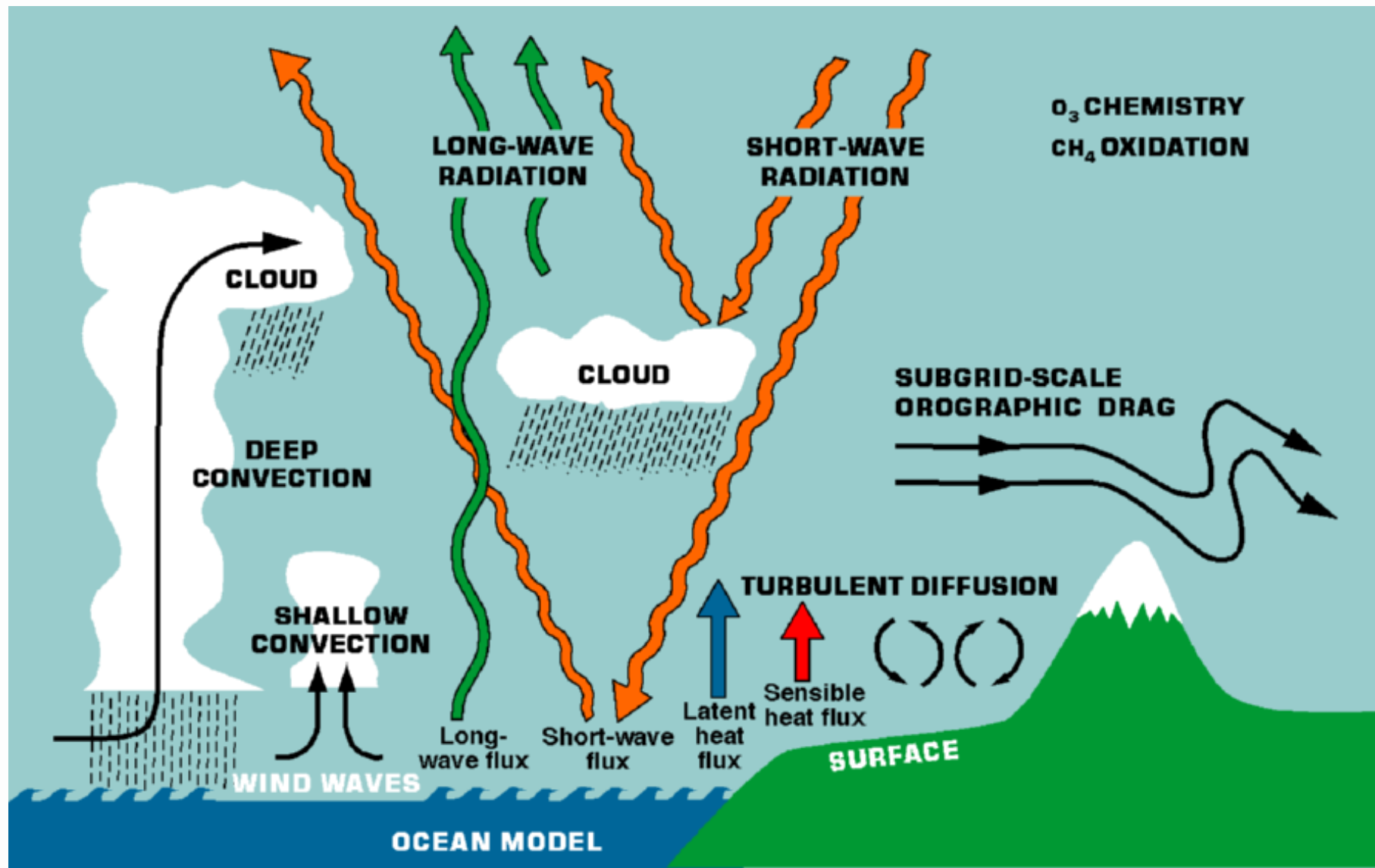
A challenge for our models :

- NEC : vector processor
- BULL : highly parallel processor

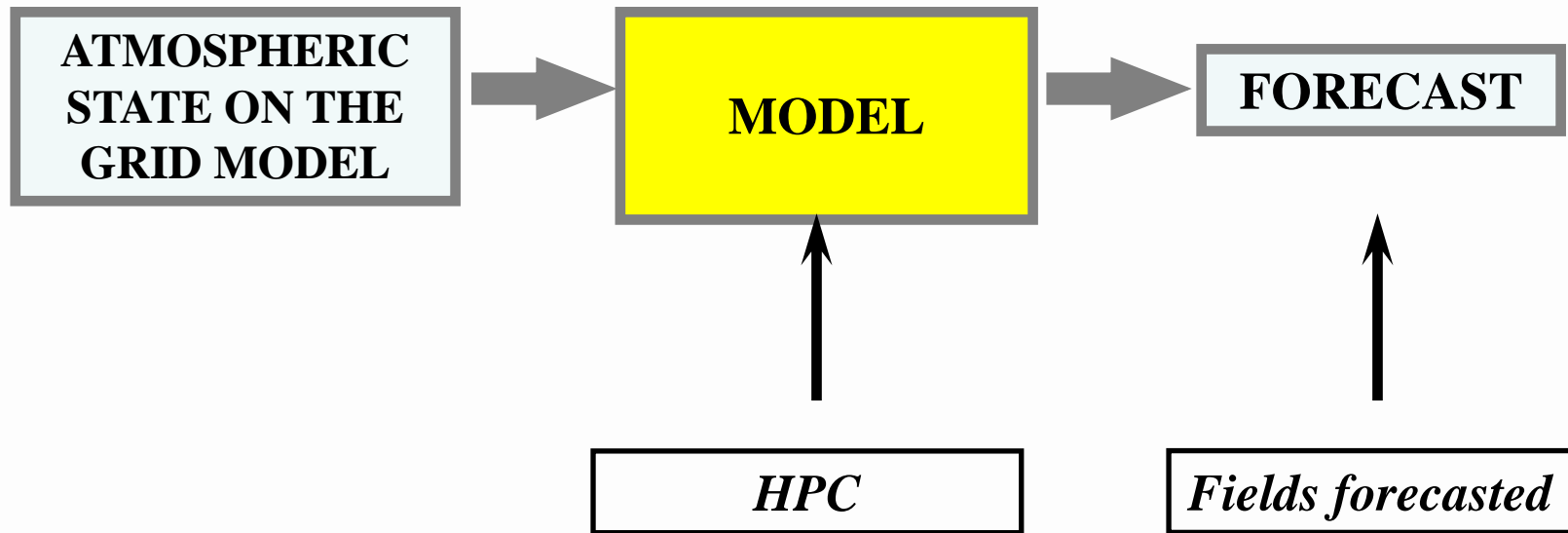
• Storage : today : 15 Po
 2018 : 180 Po

• Climate : CMIP 5 (2012) : 60 To
 CMIP 6 (2017) : 2.000 To

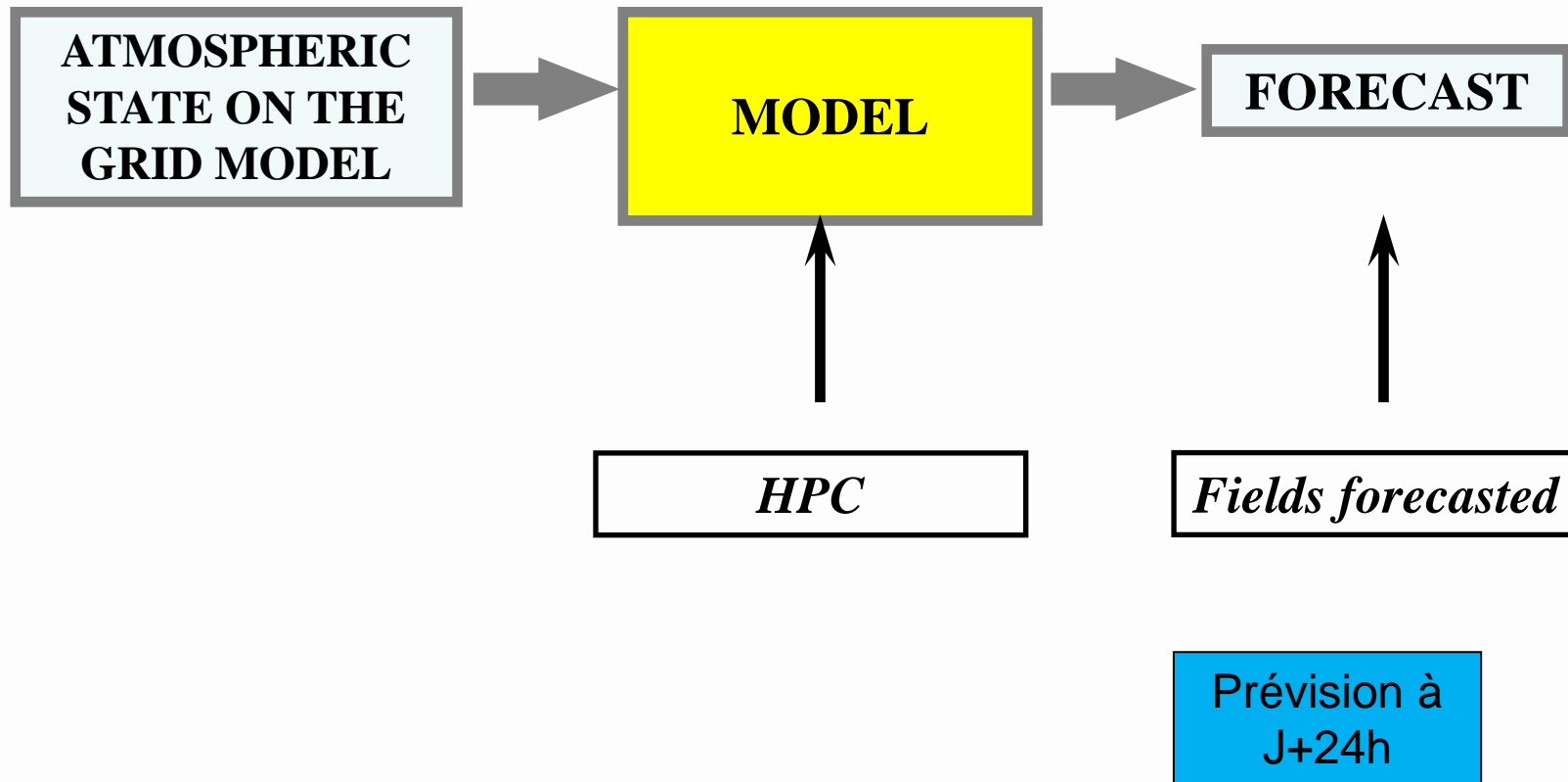
The « physics »



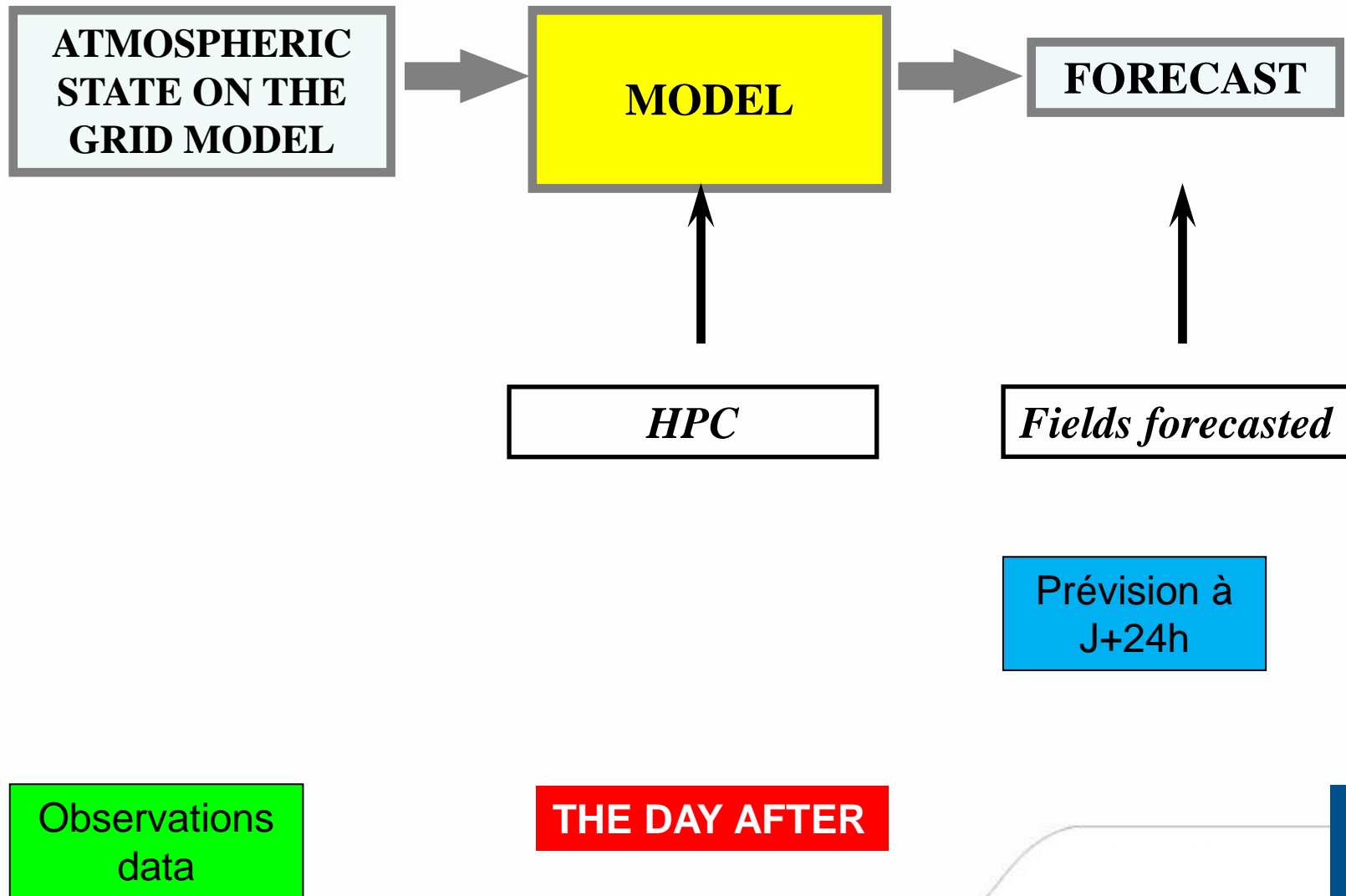
ASSIMILATION PRINCIPLE



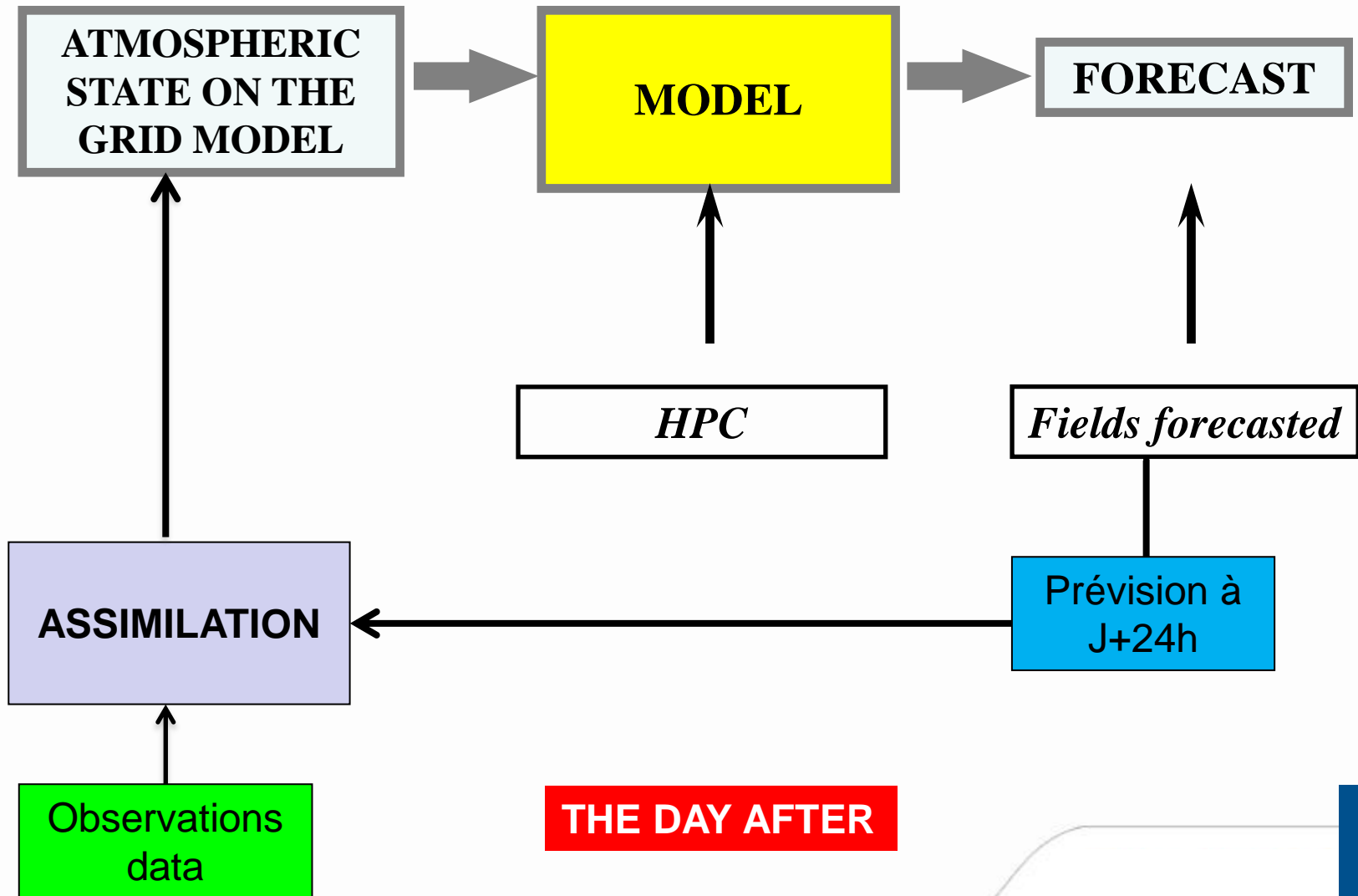
ASSIMILATION PRINCIPLE



ASSIMILATION PRINCIPLE



ASSIMILATION PRINCIPLE



Principes et équations

Equation du mouvement

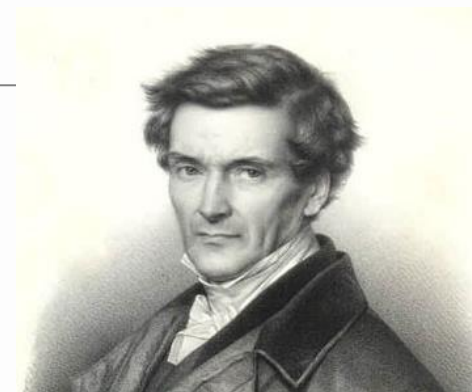
Newton (1642-1727)

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

Principes et équations

Equation du mouvement

Principe Fondamental de la Dynamique : (Newton 1642-1727)

Mécanique des Fluides : Euler (1707-1783), Saint-Venant (1797-1886), Navier (1785-1836), Stokes (1819-1903)

Force de Coriolis (1792-1843) : rotation de la Terre

⇒ **Evolution d'évolution temporelle du vent (u, v, w)** : c'est-à-dire **l'accélération du vent** 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: Clapeyron (1834)

⇒ **Relation diagnostique** entre P , T et ρ

Les données spatiales dans le modèle de PNT ARPEGE

Nb d'observations assimilées dans le 4D-Var ARPEGE : **28 x 10⁶/jour**

Observations satellitaires = **93 %** (contenu en information = **75%**)

Radiances IASI = **58 %** (contenu en information = **23 %**)

