A scenic sunset over a body of water. The sun is low on the horizon, casting a golden glow across the sky and reflecting on the water. Large, dark clouds are scattered across the sky, with some light breaking through. In the foreground, a wooden pier extends into the water. A small boat is visible on the water in the distance.

Météo, Atmosphère, Climat:

- *modélisation*
- *assimilation des observations*

la modélisation numérique de l'atmosphère

notions communes à l'océano, la qualité de l'air, l'hydrologie...

- **Modèles numériques d'atmosphère et de climat**
- **Applications:**
 - **prévision météo**
 - **étude du climat**
- **Initialisation des modèles:**
 - **système d'observation**
 - **assimilation des mesures**

Problématique:

- Représenter numériquement le système Terre
 - observations de qualité variable, irrégulièrement disposées
 - la physique est surtout connue par des lois d'évolution $dx/dt=F(x)$
 - obs pas faciles à comparer aux modèles
- **Analyse** = synthèse des données à un instant précis
- **Assimilation** = fusion modèle/observation = succession d'analyses cohérentes

Modèles numériques d'atmosphère et de climat "jumeaux numériques"

Modèles météorologiques: représenter le système à chaque instant.
Echelles fines ($dx=1-10\text{km}$), courtes durées (1h-1mois)

Modèles de climat: reproduire le comportement moyen du système, sa variabilité (fréquence d'évènements extrêmes), son évolution lente (10ans-100ans)

- Modélisation:
 - problématique
 - comment construire un modèle
 - systèmes couplés: chimie, océans, surfaces continentales
- Prévision d'ensemble
- Modèles de climat, de 'système Terre'

Vocabulaire de base: notion de climatologie

Prévision numérique:

à partir de notre connaissance de l'état actuel de l'atmosphère, simuler le plus précisément possible son état futur

Projection climatique:

simuler son état futur de manière statistique (moyennes, tendances, évolution des extrêmes...)

Climatologie:

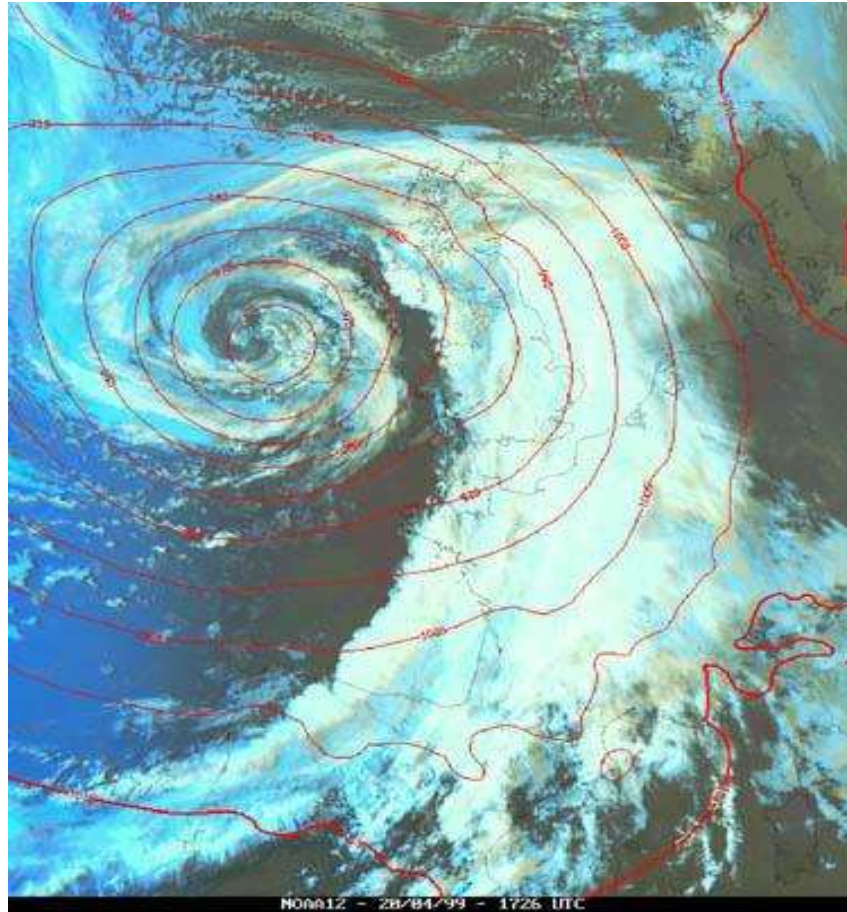
statistiques des états actuels de l'atmosphère à partir de mesures de ses états passés (typiquement, sur 30 ans): les 'normales saisonnières'

La climatologie décrit numériquement le climat actuel, c'est une référence que les prévisions doivent battre.

L'atmosphère est changeante et peu observée

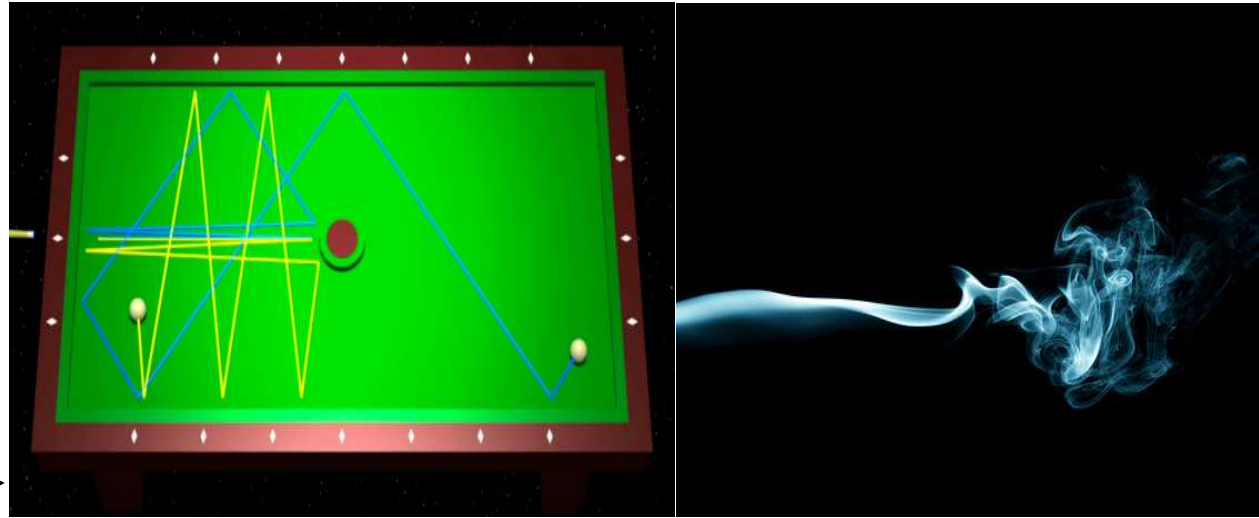
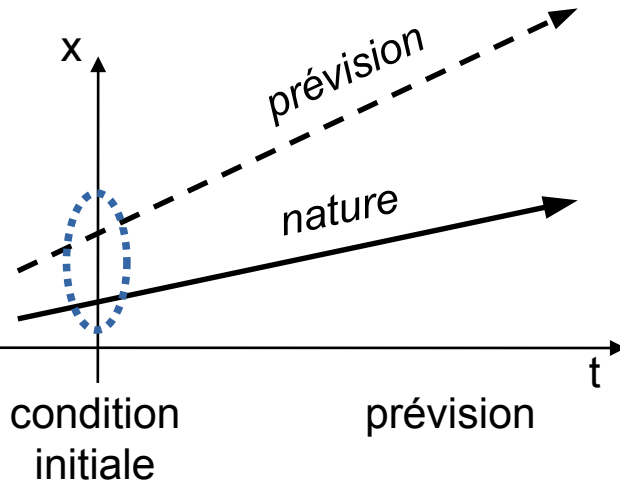
exemple: tempête vue par satellite (nuages visibles) et un modèle numérique (pression mer): les obs renseignent peu sur les variables prédictives (ici, le vent).

Les situations ne se reproduisent jamais 2 fois: handicap pour les modèles IA :
ratio données observées / variables d'état $\ll 1$



l'atmosphère est chaotique: "effet papillon"

*Les prévisions dérivent
avec le temps*



Chaos = amplification rapide des erreurs de prévision par certains phénomènes (ex: jets, nuages convectifs).

• existe dans la nature et dans les modèles numériques:

- Les prévisions synoptiques (tempêtes, anticyclones...) sont en moyenne inutiles après 10j d'échéance
- Les prévisions régionales (pluies, nuages) le sont après 24h environ
- Les prévisions locales (pluie/soleil, brouillard, ondées, orage...) le sont après quelques heures

le chaos naturel peut être simulé dans les modèles numériques

système de Lorenz:

évolution d'un modèle à 3
variables (x,y,z)

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = rx - y - xz$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - bz$$



évolution d'une sphère
dans 3 zones différentes

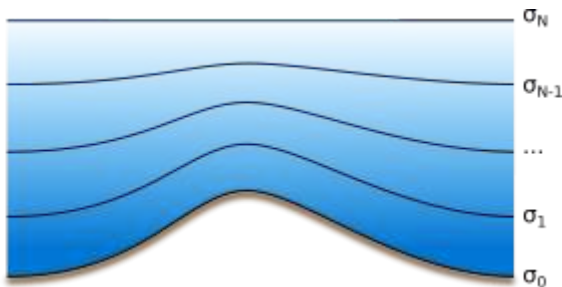
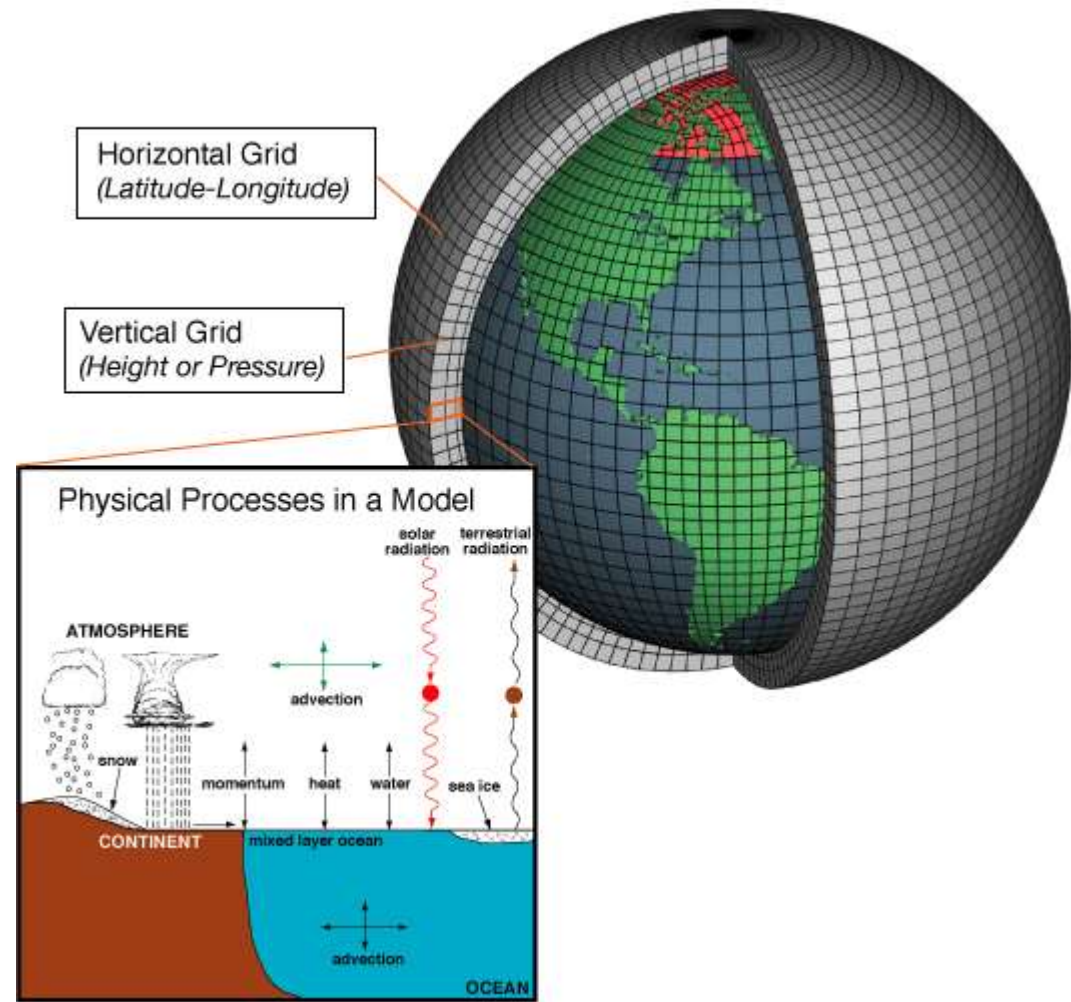


se retrouve dans les équations de la mécanique des fluides en présence d'instabilités dynamiques

sensibilité à la condition initiale = limitation des échéances de prévision utiles

Conception des modèles de simulation numérique de l'atmosphère utilisés en prévision, climat, réanalyses

- Discrétiser un fluide 3D
- Identifier des lois physiques d'évolution
- Simplifier au maximum
- Compléter par des termes correctifs: 'paramétrisations physiques'



Les lois d'évolution de l'atmosphère sont à peu près connues *mais nombreux facteurs mal connus, mal calculés, ou non observés*

Equations continues: (mécanique des fluides)

$$dx/dt = F(x,t) + \phi(t)$$

x état du fluide (champs 3D continus)

ϕ influences externes

Version discrétisée dans le temps et l'espace :

$$x(t+Dt) - x(t) = G(x,t) + \gamma(t)$$

x vecteur d'état discrétisé (=U,V,T... sur une grille)

G discrétisation de F

γ influences externes, discrétisées

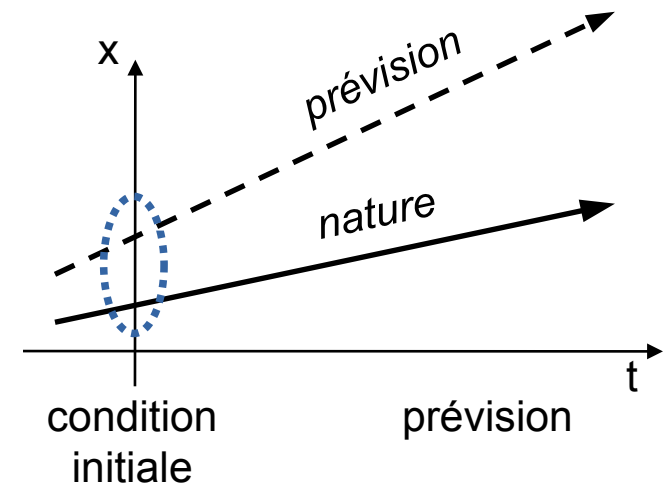
Intégration temporelle: $x(t_0+Dt) = M(x(t_0), t_0)$

M : opérateur de prévision

$x(t_0)$: **analyse** (imparfaite) de l'atmosphère à t

$x(t_0+Dt)$: prévision à échéance Dt

*Les prévisions dérivent
avec le temps*



Sources d'erreurs de prévision = sujets d'effort en R&D et ressources calcul :

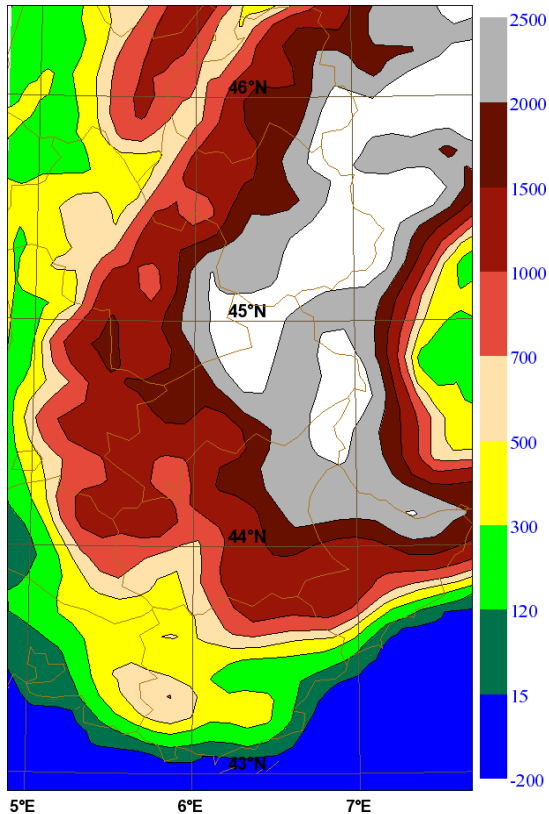
- **design du modèle d'évolution** $dx/dt = F(x)$: erreurs de modélisation et approximations numériques
- **données aux limites (surfaces)** et observations pour l'initialisation
- **condition initiale**: extrapolation d'observations incomplètes (=analyse)

En météo, les erreurs sur la condition initiale produisent environ 50% des erreurs de prévision.

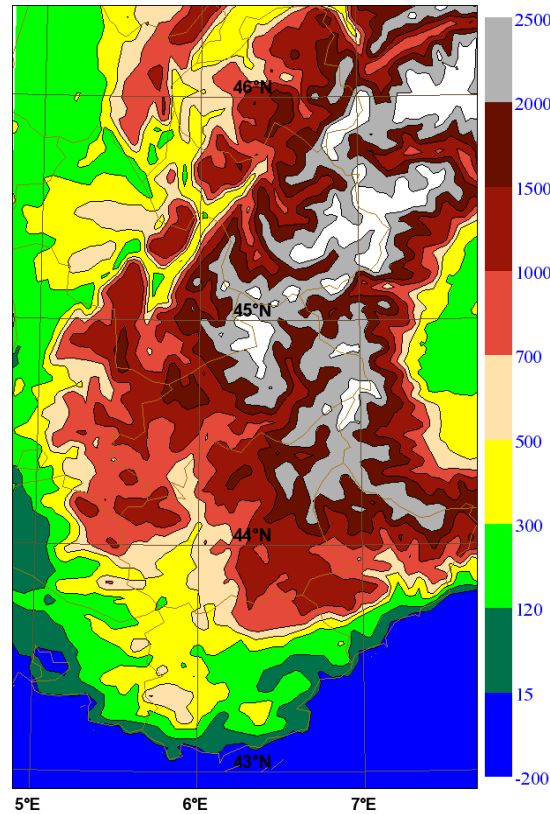
Importance de la résolution de calcul

Représentation du relief alpin dans 2 modèles:

ARPEGE dx=10km



AROME dx=2,5km



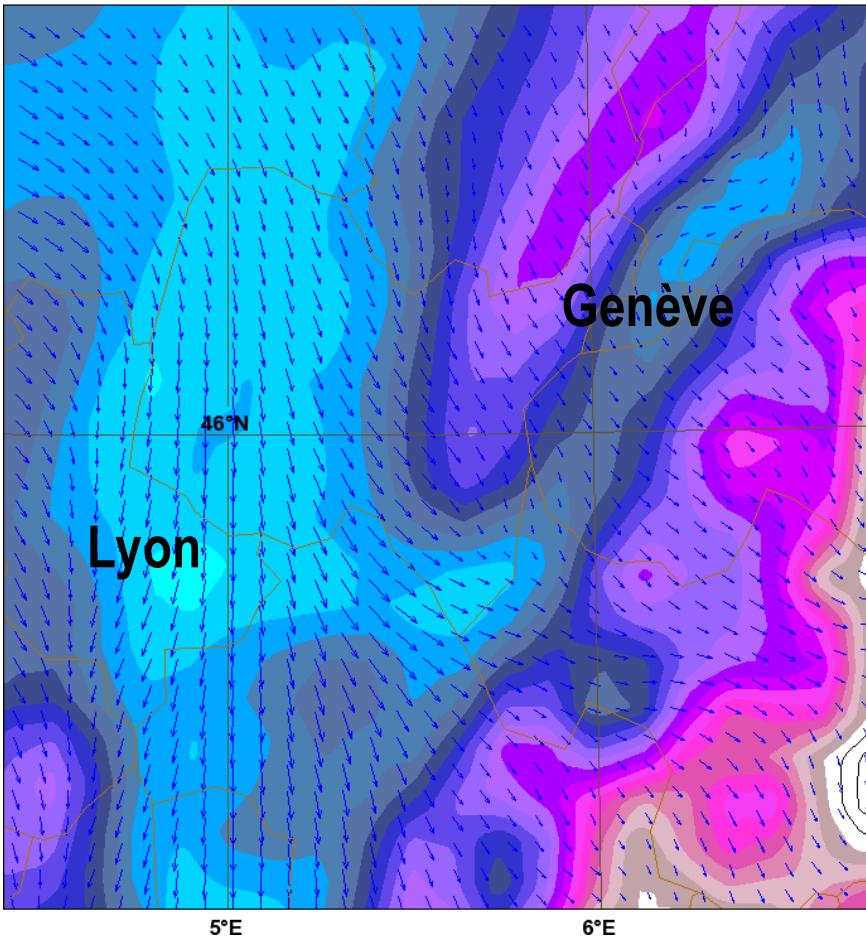
réalité



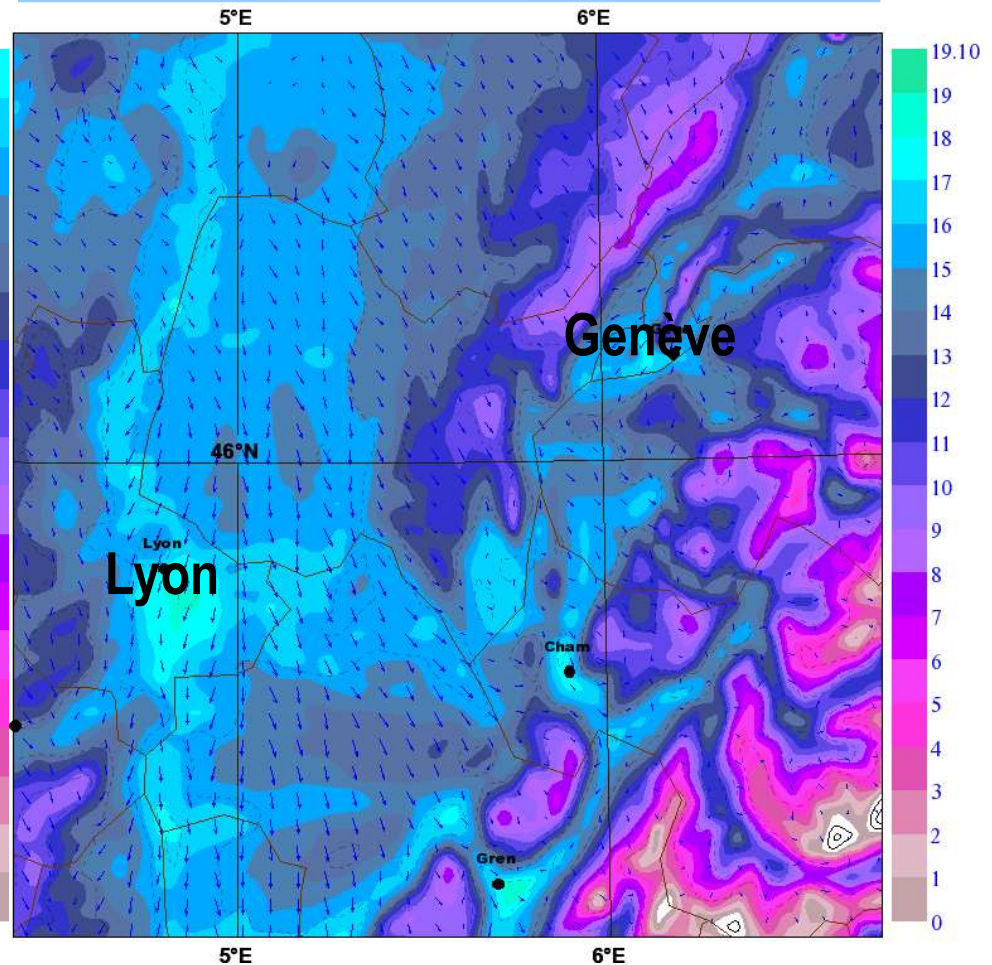
La résolution du relief a un impact direct sur l'atmosphère:

effet plus réaliste des villes, vallées, montagnes, lacs...

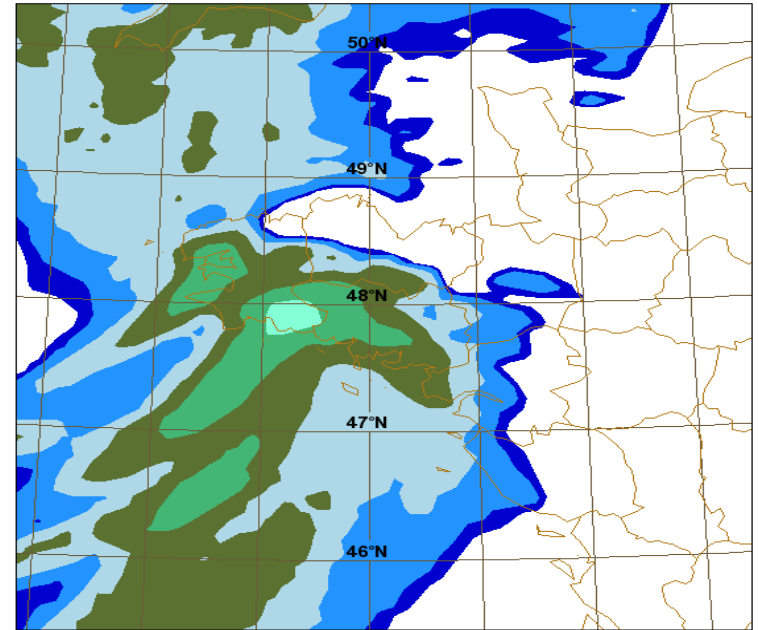
Température in Arpège (dx=10km)



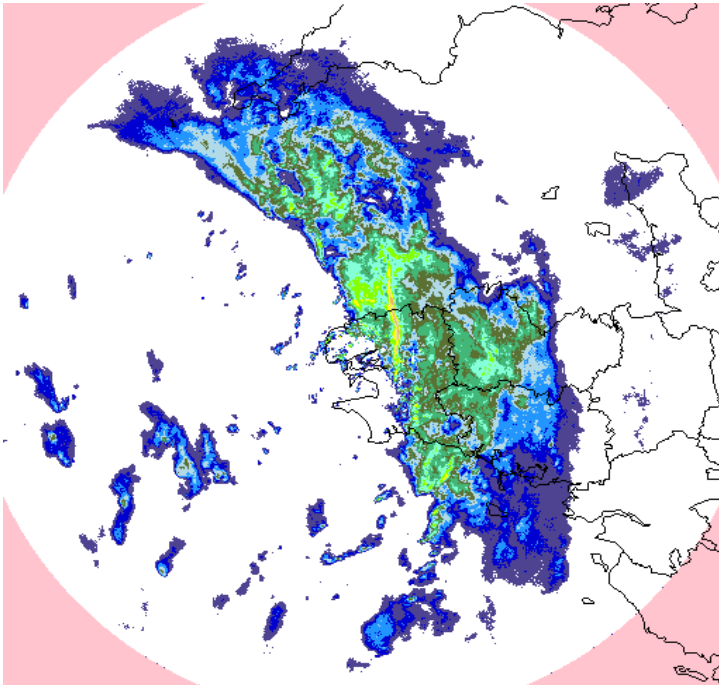
Température in Arome (dx=2.5km)



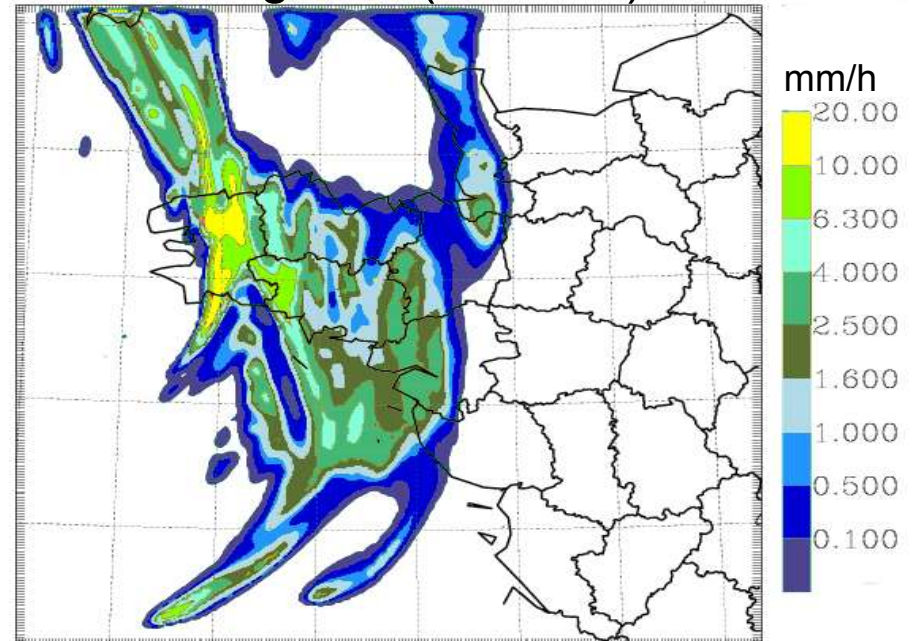
modèle global (dx=20km)



observation radar (dx=1km)

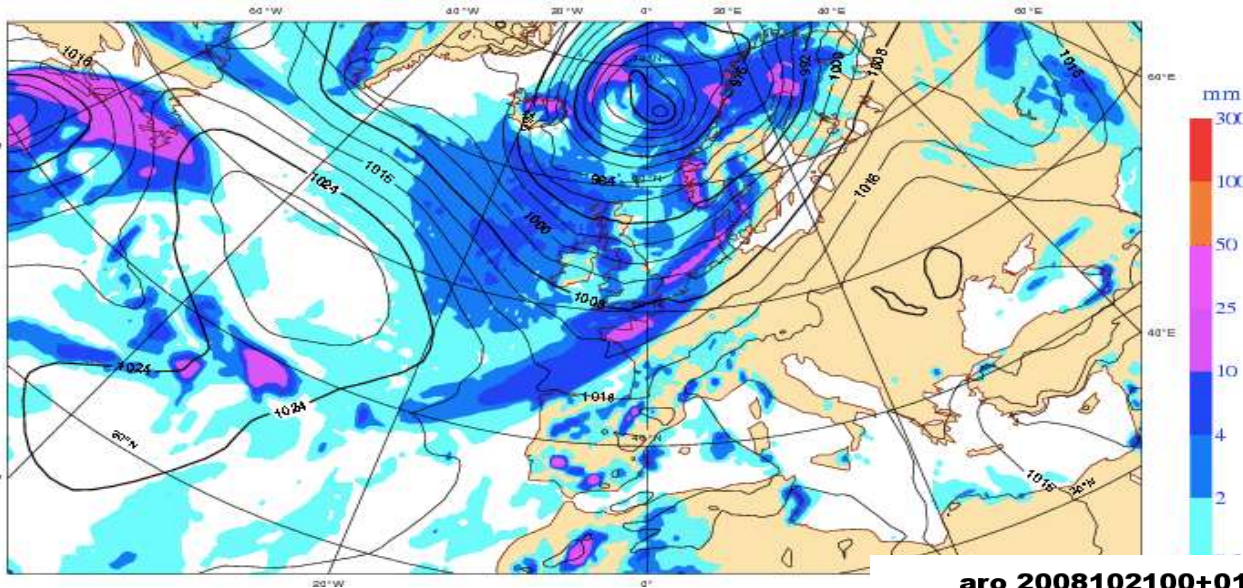


modèle régional (dx=2km)

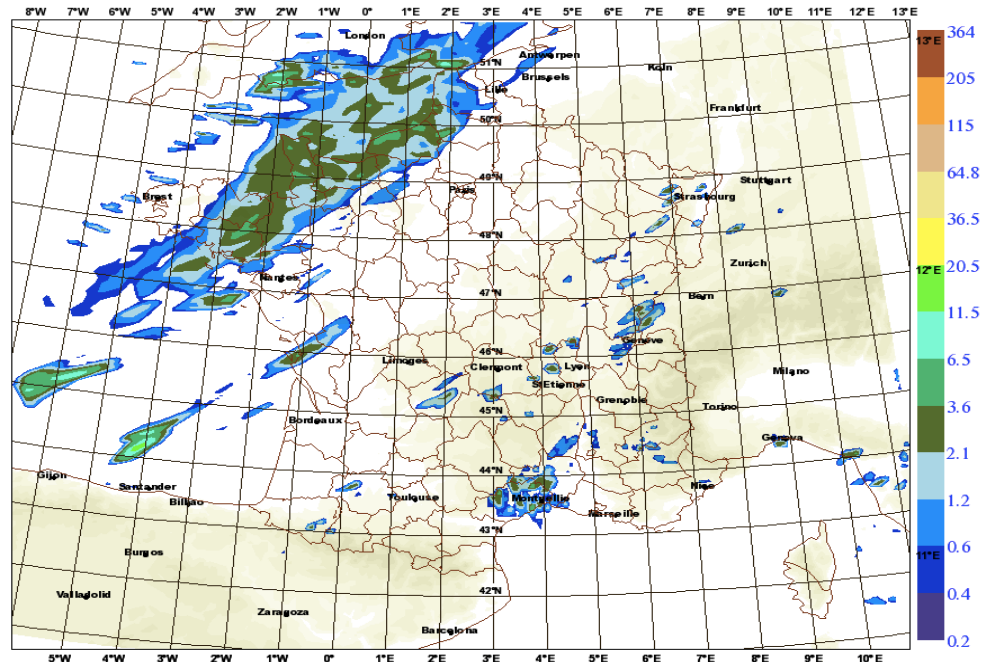


Prévision de pluie dans ARPEGE (résolution 25km)

Lundi 20 Octobre 2008 18UTC - Prevision t+6h : Mardi 21 Octobre 2008 00UTC (HC)
 Pression Mer / Precipitations totales (cumul HC-06/HC+06)



aro 2008102100+0100 totalrain(mm) over last 1h



Prévision de pluie dans AROME (résolution 2,5km)

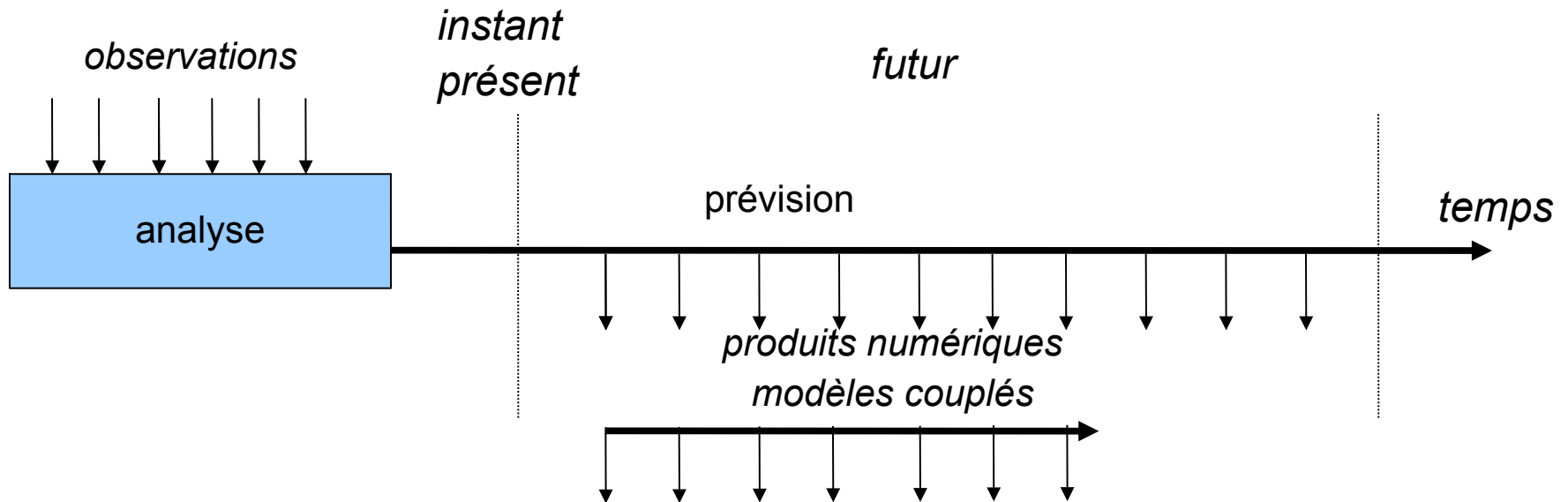
Prévision numérique en pratique

But: fournir des prévisions tôt, de bonne qualité, sans interruption de service

- Organisation d'une production temps réel
- Elaboration des produits
- Processus d'amélioration & validation

Production en temps réel

renouvelée plusieurs fois/jour, chacune dure quelques heures



- **Modèles globaux** (GCM: *general circulation models*): résolutions $dx \sim 10\text{km}$, échéances 2-20j
- **Modèles régionaux** (LAM: *limited area models*): résolutions $dx \sim 1\text{km}$, optimisés pour les phénomènes locaux (inondations, orages, brouillards..., échéances 3h-48h)
- **Modèles de recherche et de climat**: idem, mais pas en temps réel, donc plus fins ou plus longs.

Produits de prévision numérique:

- **variables pronostiques** (=dont le modèle calcule l'évolution): vent, température, humidité, nuages, précipitations, état du sol, de la mer, polluants, etc. sur la grille du modèle
- **diagnostiques** déterministes (dérivés des pronostiques): rafales, turbulence, cumul de pluie, évaporation, dispersion, couverture nuageuse, température minimale et maximale...
- **produits probabilistes** (ex:risque de dépassement d'un seuil): risque de verglas, de brouillard, de foudre, etc...

Productions en aval des modèles

sorties
numériques
brutes

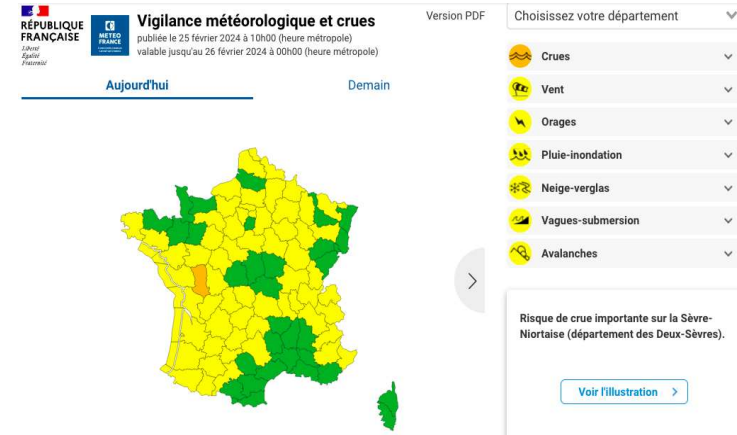
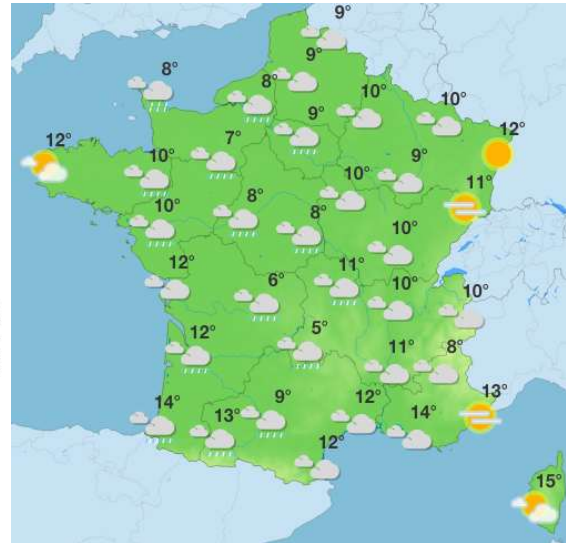
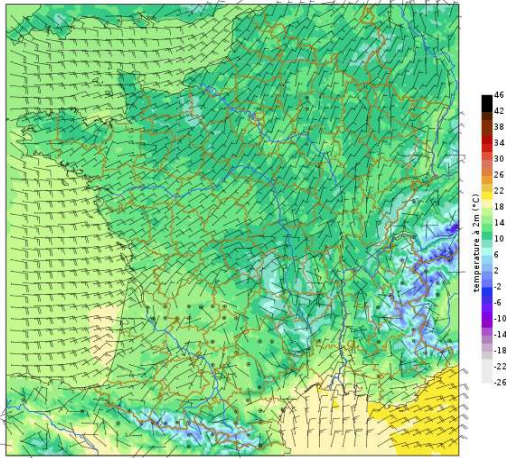
prévisionniste

produits
expertisés,
bulletins

prévision-conseil,
modèles d'impact

aide à la décision,
vigilance

Vendredi 9 Octobre 2015 06UTC - Prevision Arôme t+12h: Vendredi 9 Octobre 2015 18UTC
Température à 2m et Vent à 10m



- **Présentations des produits numériques:** cartes, graphes temporels, interprétation en **temps sensible** local (soleil, pluie, T à 2m, vent à 10m)
- **Interprétation par les prévisionnistes :** apporte une valeur ajoutée en corrigeant les défauts du modèle, en expliquant les phénomènes
- **Produits pour usages spécifiques:** vigilance sécurité civile / grand public, aviation, énergie, BTP, agriculture, finance...

Comment faire progresser un modèle opérationnel temps réel:

indicateurs de performance :

- 'scores' = distances des prévisions aux observations ou aux analyses
- diagnostics de réalisme physique (ex: bilan radiatif)
- performance subjective (événements extrêmes et rares)

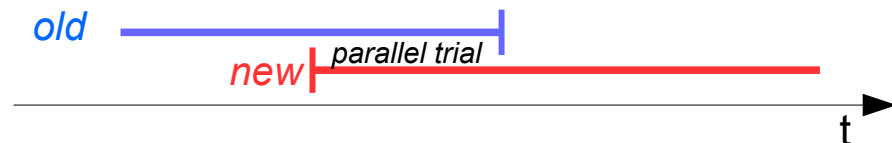
préparation des modifications:

- en mode recherche (cas-tests, longues périodes)
- parallèle (prévisions temps réel = plus de triche possible)

décision de bascule (~ 1 fois par an), toujours subjective (indicateurs souvent contradictoires)

production ininterrompue et réversible

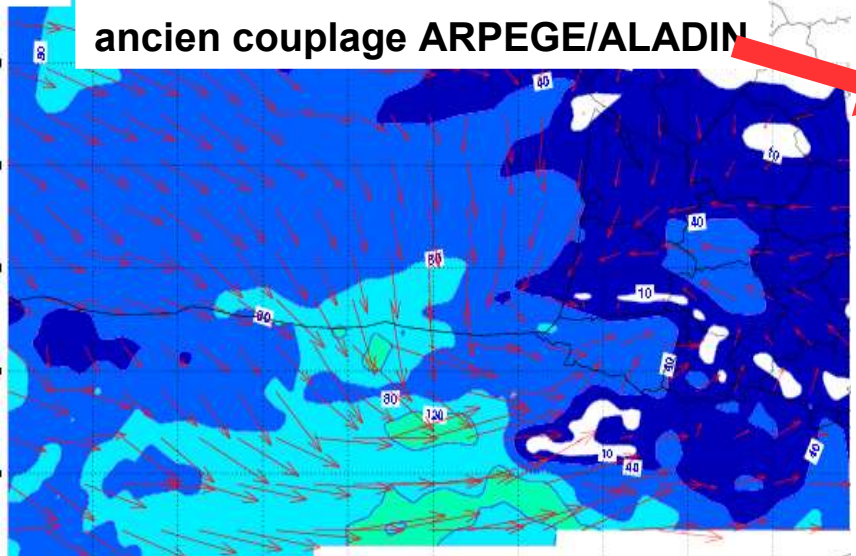
Les améliorations sont rarement systématiques (forte variabilité des erreurs)



impact d'améliorations des modèles sur la prévision de la tempête du 24 janvier 2009

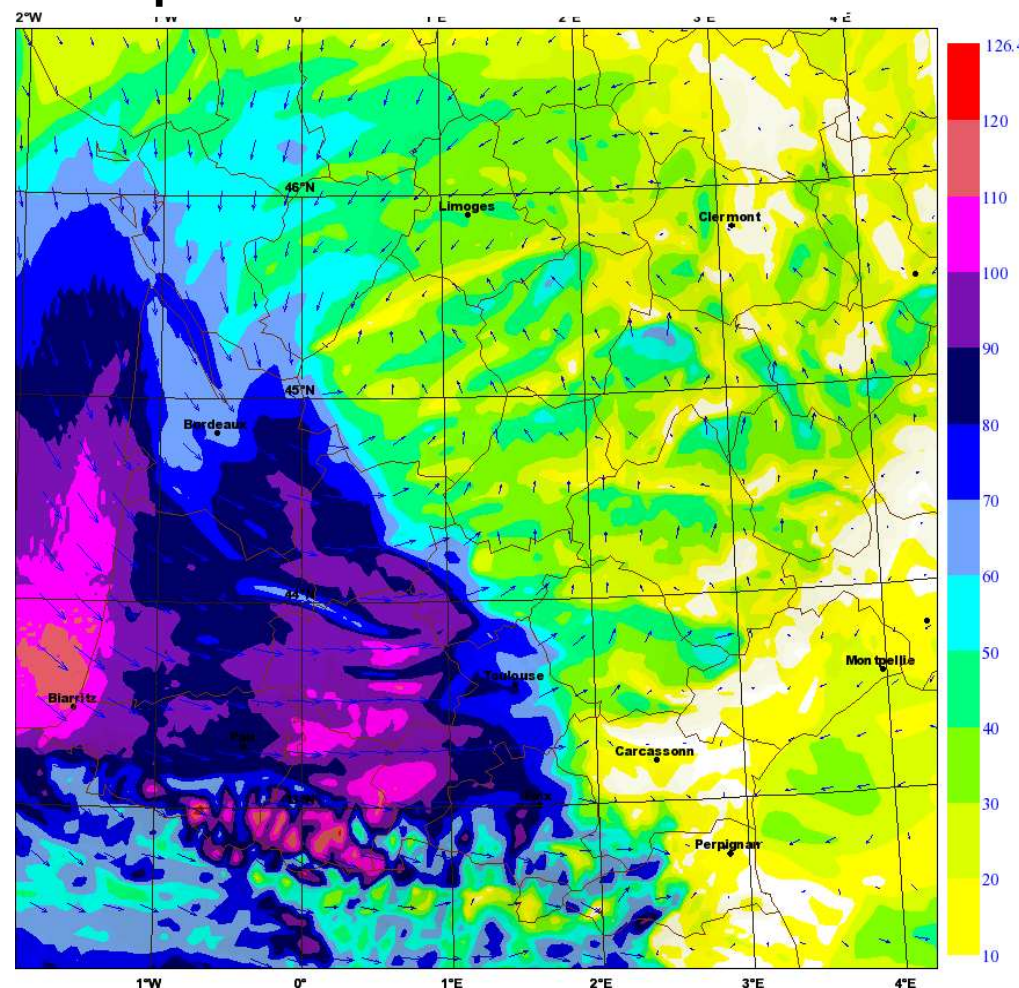
prévi la veille au matin:

ancien couplage ARPEGE/ALADIN

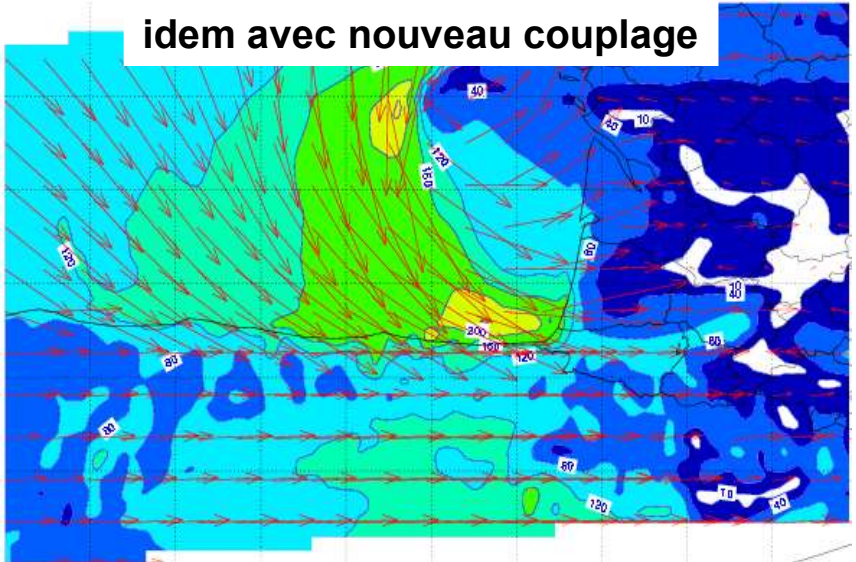


prévision de rafales par Arome

opérationnel la veille au soir

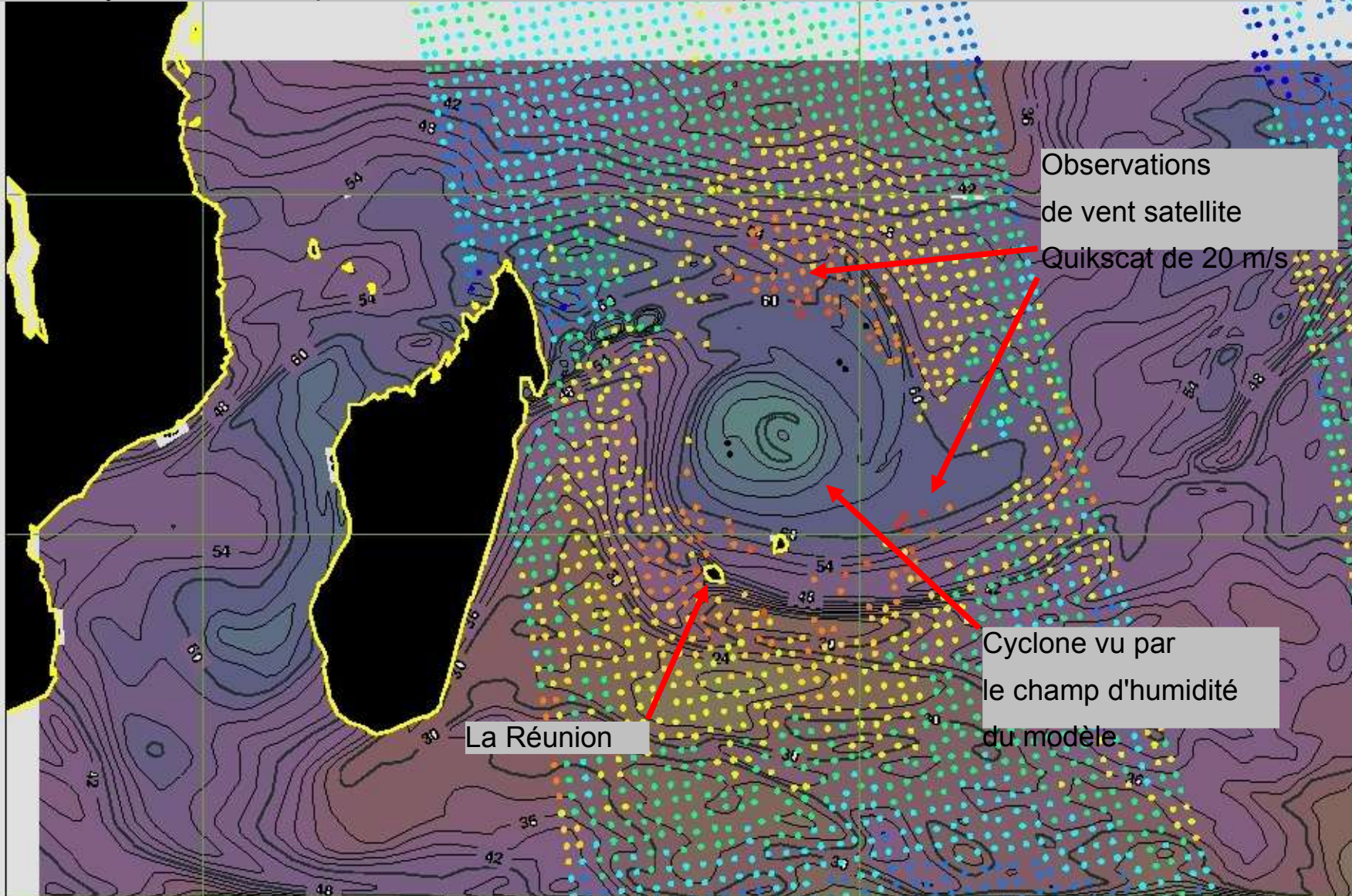


idem avec nouveau couplage



Validation par études de cas pour les évènements rares

Prévision cyclone Gamède par le modèle ALADIN dx=10km (24/2/2007)

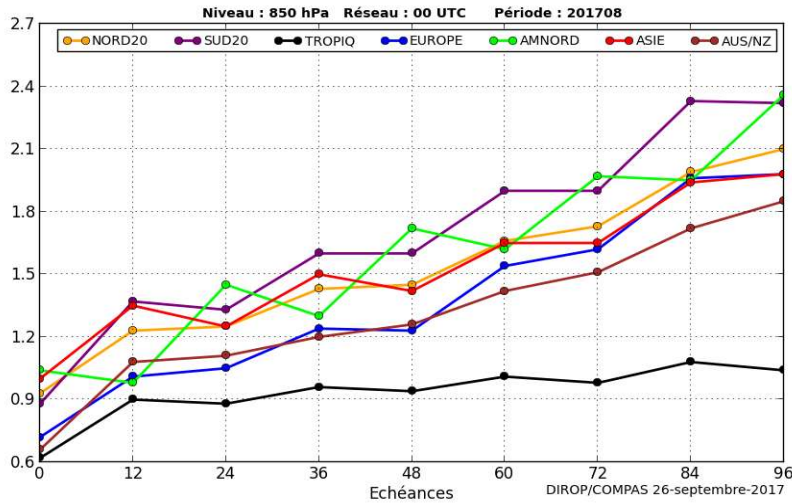


exemples de scores: modèle global Arpège

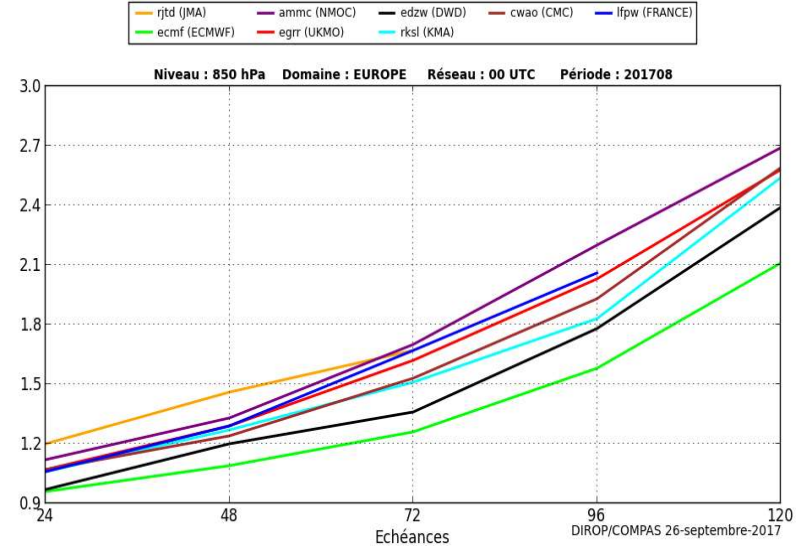
$rmseT(\text{prévi} - \text{radiosondes}) = f(\text{zone}, \text{échéeance})$

$rmseT(\text{prévi} - \text{radiosondes}) = f(\text{centre météo}, \text{échéeance})$

EQM de prévision de la température (en K) par rapport aux RS suivant les domaines



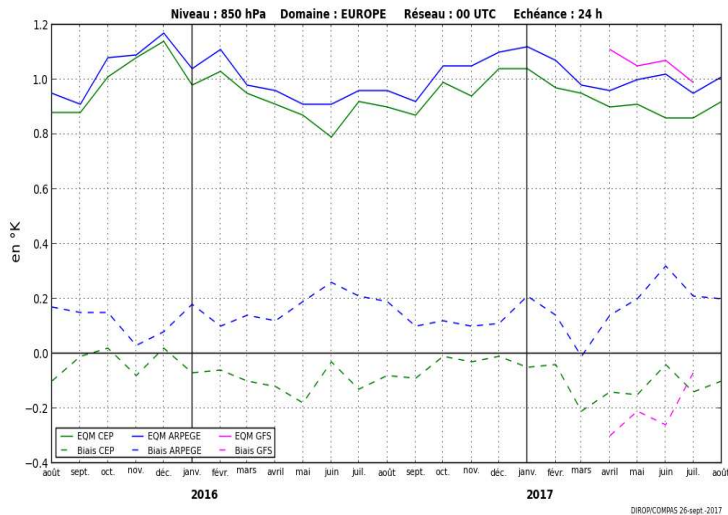
Erreur Quadratique Moyenne de prévision de la température (en K) par rapport aux radiosondages



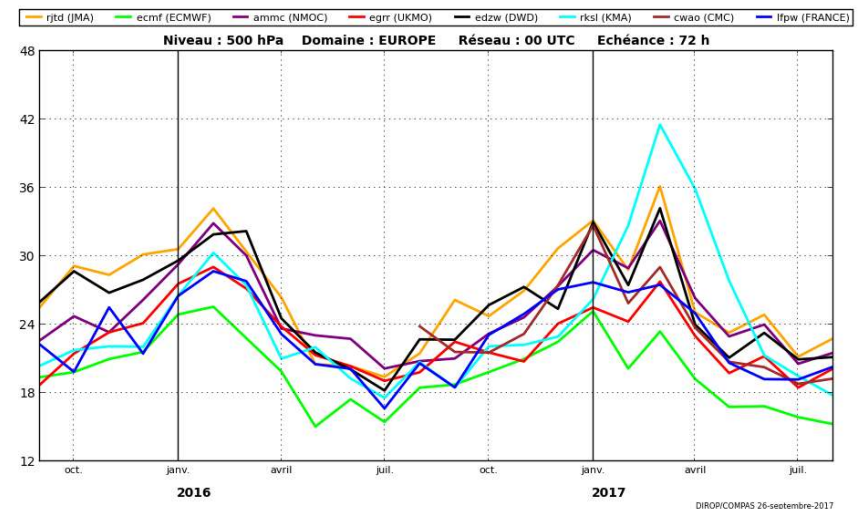
$rmseT(\text{prévi} - \text{radiosondes}, \text{ech}=24\text{h}) = f(\text{mois}, \text{centre})$

$rmseZ(\text{prévi} - \text{radiosondes}, \text{ech}=72\text{h}) = f(\text{mois}, \text{centre})$

Erreur Quadratique Moyenne et Biais de prévision de Température par rapport aux radiosondages

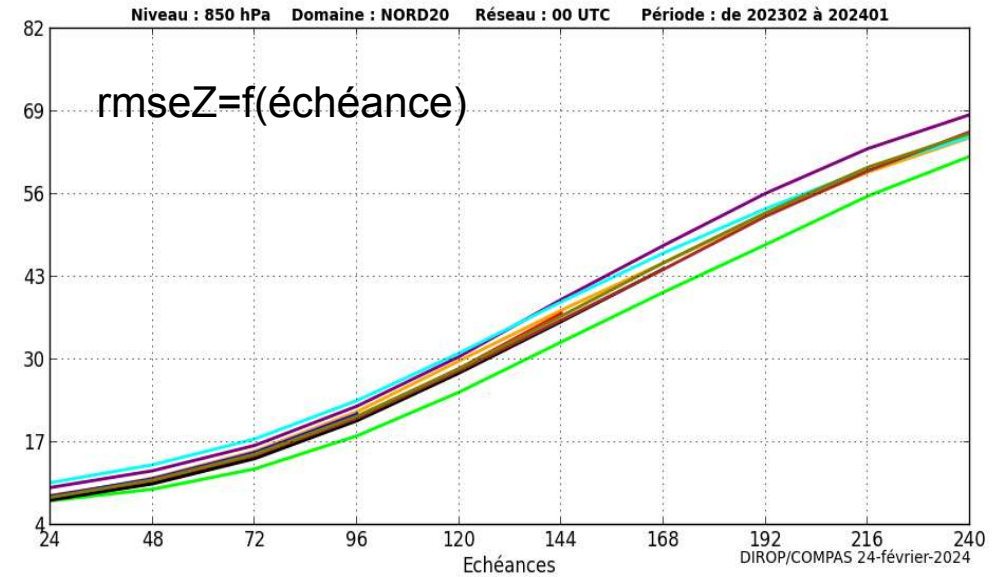
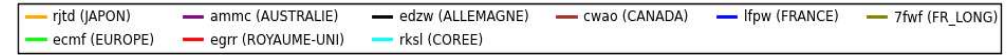


Erreur Quadratique Moyenne de prévision du géopotential (en m) par rapport aux radiosondages

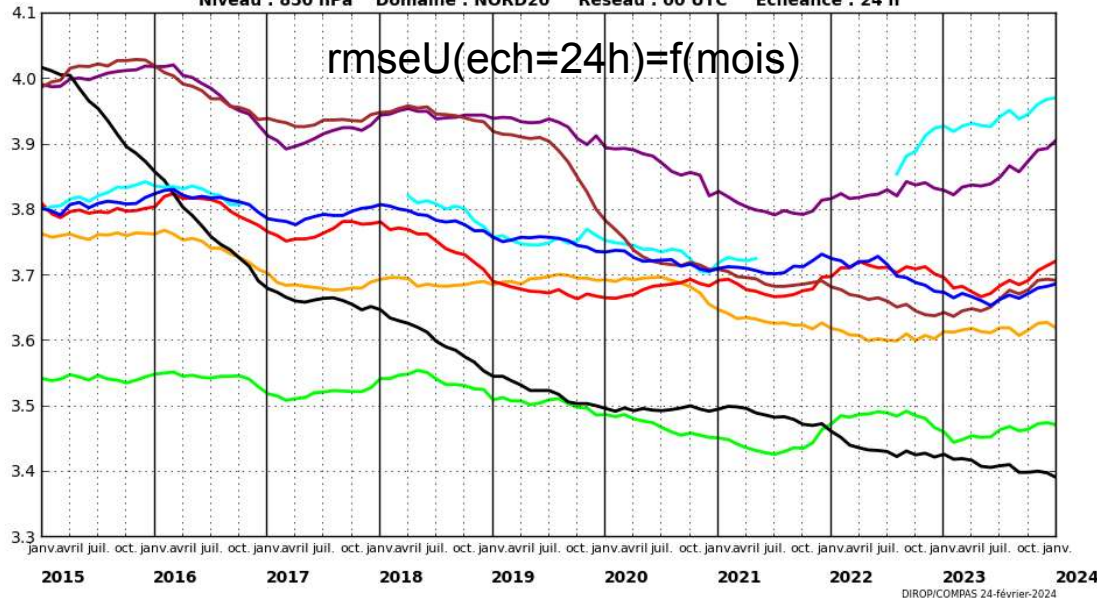


Comparaison des scores des principaux centres de prévision météo

Erreur Quadratique Moyenne de prévision du géopotentiel (en m) par rapport aux radiosondages



Erreur Quadratique Moyenne de prévision de vent (en m/s) par rapport aux radiosondages

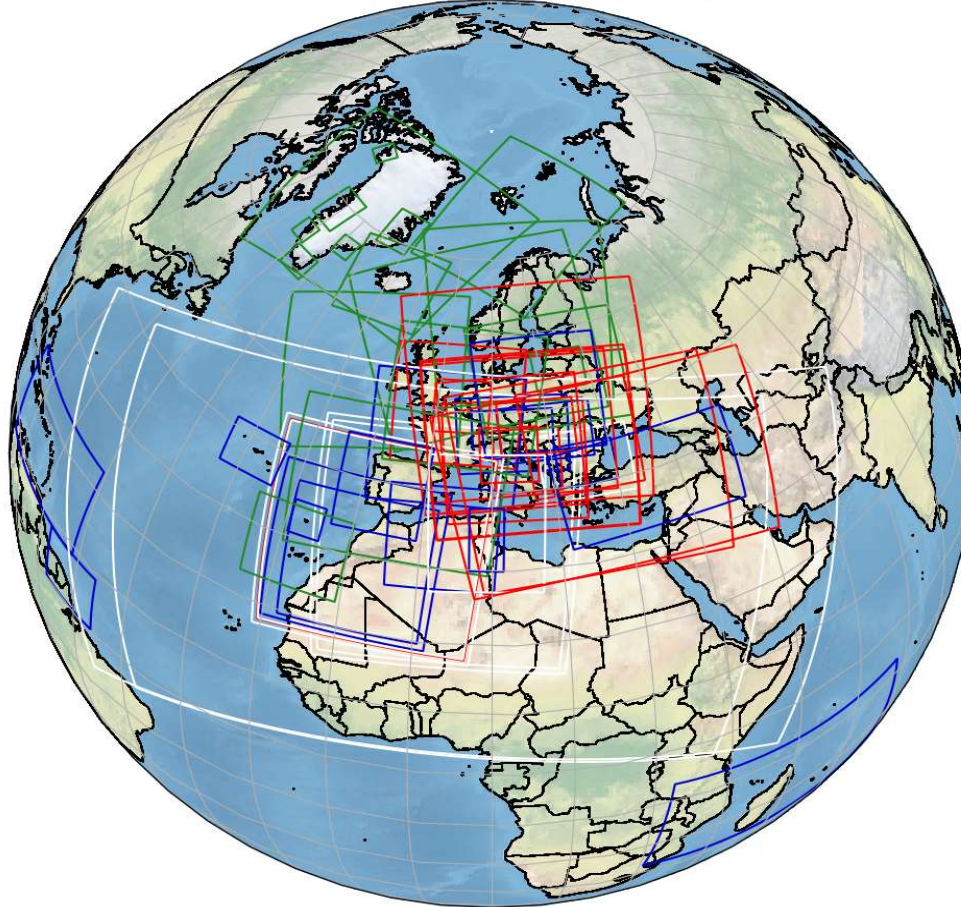


Aspects internationaux de la prévision numérique

- **Modèles globaux:** une dizaine, chacun nécessite un supercalculateur et une équipe de R&D spécifique.
- **Modèles régionaux:** une centaine, souvent installés sur serveur dans les centres météo nationaux, nécessitent l'alimentation du couplage par un modèle global.
- **Principales coopérations sur les modèles régionaux:**
 - WRF/UFS (USA et labos de recherche),
 - AROME/ACCORD (France, Europe, Afrique du N)
 - COSMO/ICON (Allemagne, Italie, Suisse),
 - UM (GB, Commonwealth).

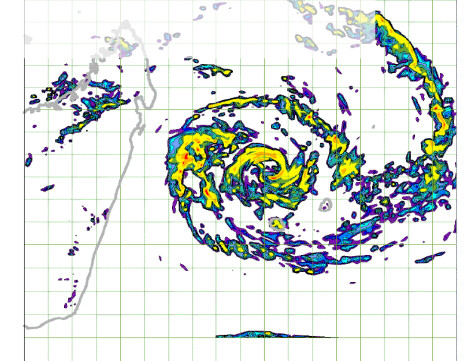
Quelques modèles nationaux avec le logiciel AROME

ACCORD CSCs : AROME (blue) HARMONIE-AROME (green), ALARO (red) ALADIN (white)

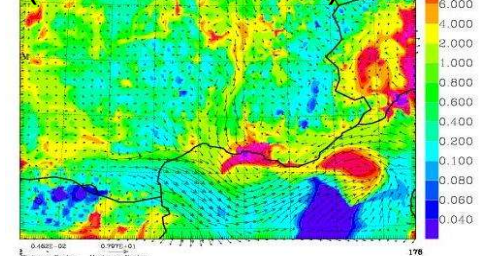


ALGERIA: AROME-NORD-ALGE
 ALGERIA: ALGE (ALADIN)
 ALGERIA: ALADIN_DUST
 AUSTRIA: AROME-RUC
 AUSTRIA: AROME-AUT
 BELGIUM: BELGIUM-ALARO-1.3KM
 BELGIUM: BELGIUM-ALARO-4KM
 BULGARIA: ALADIN-BULGARIA
 BULGARIA: AROME BG
 CROATIA: HR-ALARO-22
 CROATIA: HR-ALARO-44
 CZECH REP: CZ-ALARO
 DENMARK: DMI-NEA
 DENMARK: DMI/VI-IGB
 DENMARK: DMI/SCB
 DENMARK: DMI/SGL
 DENMARK: DMI/NK
 DENMARK: DMI/TAS
 DENMARK: DMI/QA
 DENMARK: DMI/DB
 FRANCE: AROME-FRANCE
 FRANCE: AROME-ANTILLES
 FRANCE: AROME-CALEDONIA
 FRANCE: AROME-GUYANA
 FRANCE: AROME-POLYNESIA
 FRANCE: AROME-INDIAN
 HUNGARY: AROME-HU
 HUNGARY: ALARO-HU
 ICELAND: VI-ICELAND
 IRELAND: AROME-IRELAND25
 LITHUANIA: LITHUANIA
 LITHUANIA: LITHUANIA850
 METCOOP: METCOOP-25D
 MOROCCO: AROME-1.3
 MOROCCO: AROME.2.5
 MOROCCO: ALARO-5
 MOROCCO: ALADIN-MAROC-7.5
 MOROCCO: ALADIN-MAROC-10
 MOROCCO: ALADIN-NORAF-10
 MOROCCO: ALADIN-NORAF-18
 NETHERLANDS: KNMI
 NORWAY: MET-NORWAY/AROME-ARC
 POLAND: P020-AROME
 POLAND: E040-ALARO
 PORTUGAL: AROME-PORTUGAL(PT2)
 PORTUGAL: AROME-MADEIRA(MAD)
 PORTUGAL: AROME-AZORES(AZO)
 ROMANIA: ALARO-RO
 SLOVAKIA: ALARO-4.5
 SLOVAKIA: ALARO-2
 SLOVENIA: ALARO
 SLOVENIA: ALARO-RUC
 SLOVENIA: ALARO-SEEMHEWS
 SPAIN: AEMET-IB IBERIA
 SPAIN: AEMET-IC CANARIAS
 TUNISIA: TUNISIA ALADIN
 TUNISIA: AROME-TUNISIE
 TURKEY: TURKEY-AROME
 TURKEY: TURKEY-ALARO

Arome-Reunion



Arome-chemistry (NOx on France)



Thèmes de R&D actuels en modélisation atmosphérique

- modèles numériques à très haute résolution, turbulence 3D, microphysique nuageuse détaillée, aérosols
- surfaces ultra détaillées (végétation, villes, jardins/irrigation, chaussées, plans d'eau, vagues...)
- nouveaux supercalculateurs (GPU)
- mesures satellites, radar, lidar, objets connectés
- algorithmes d'assimilation de données
- prévi des extrêmes, probabiliste, prévi immédiate, prévision saisonnière, scénarios climatiques
- approximation des modèles numériques par des émulateurs IA moins coûteux

prochaine séance :

Comment construire un modèle numérique d'atmosphère/climat

- Equations de base
- Discrétisation et Calcul
- Physique, couplages
- Diagnostics

*Merci pour votre
attention*