A scenic sunset over a body of water, with a bridge in the foreground. The sky is filled with dramatic, colorful clouds. The water reflects the warm hues of the sunset. A white rectangular box is overlaid on the image, containing the text.

Construire un modèle numérique (en météo, océano, chimie, etc)

- Equations de base
- Discrétisation et Calcul
- Paramétrisations physiques, couplages
- Diagnostics

Equations dynamiques : principe

- Définition de la **particule** dont on calcule l'évolution: air sec ou humide, en équilibre thermodynamique local
- Equation d'état (**gaz parfaits** + condensats)
- Conservation de la masse (loi de **continuité**)
- Conservation de l'**énergie** (1er principe, $C_p dT = dQ$)
- Conservation de la **quantité de mouvement**
- Viscosité (en fait, dissipation turbulente)
- =équations de **Navier-Stokes**
- **référentiel**: la Terre, non-galiléen car la vitesse de rotation n'est pas négligeable aux échelles de temps météo.

Équations dynamiques (simplifiées !)

$dV/dt = -1/\rho \cdot \text{grad}p - 2\Omega \wedge V + F_v$	conservation de la qté de mouvement
$\text{div}(\rho V) = -dp/dt$	conservation de la masse
$d(C_p T)/dt = F_T$	1er principe thermodynamique
$p = \rho R T$	gaz parfait humide
$dq_i/dt = F_i = \text{Sources} - \text{Puits}$	conservation de l'espèce chimique i

Les termes F_v, F_T, F_i (**paramétrisations**) représentent les phénomènes physiques non explicitement décrits par ces équations

notations:

$V = (u, v, w)$ vecteur vitesse du vent

p pression

ρ densité kg/m³

C_p chaleur massique (dépend de l'humidité)

T température

q_i concentration massique en espèce i (eau, CO₂, NO_x, aérosols...)

Importance des simplifications

Approximations physiques: (question d'échelles pertinentes)

- propagation quasi-instantanée des ondes acoustiques
- mouvements verticaux faibles par rapport aux mouvements horizontaux
- écoulement près du sol quasi-parallèle au sol
- concentration en eau << air
- ...etc...

Optimisations numériques:

- schémas de discrétisation efficaces (semi-implicite, calculs itératifs)
- calculs parallélisables
- ...etc...

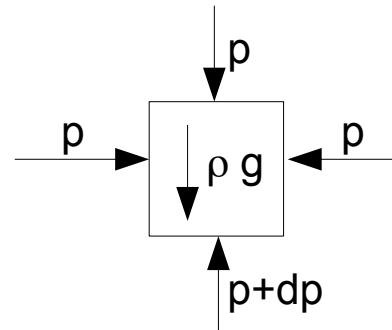
Permettent de gagner plusieurs ordres de grandeur de CPU par rapport à une discrétisation naïve des équations, à condition de bien comprendre la physique du problème.

quels sont les processus dominants ?

Processus dominants en météorologie

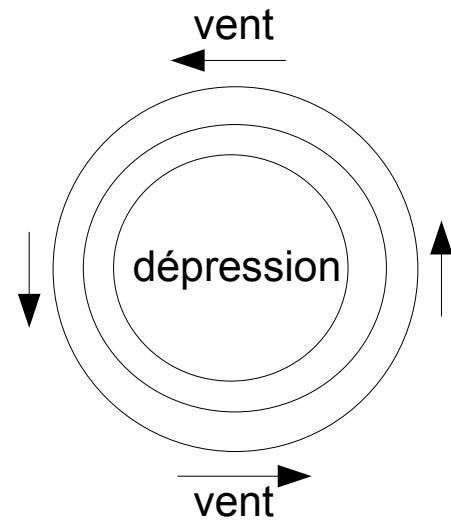
quasi-équilibre hydrostatique: $dp/dz = - \rho g$

- fluide inviscide
- équilibre pression/gravitation
- accélération verticale faible



quasi-équilibre géostrophique: $\text{grad}p = (2\Omega \sin(\text{lat})) k \wedge V$

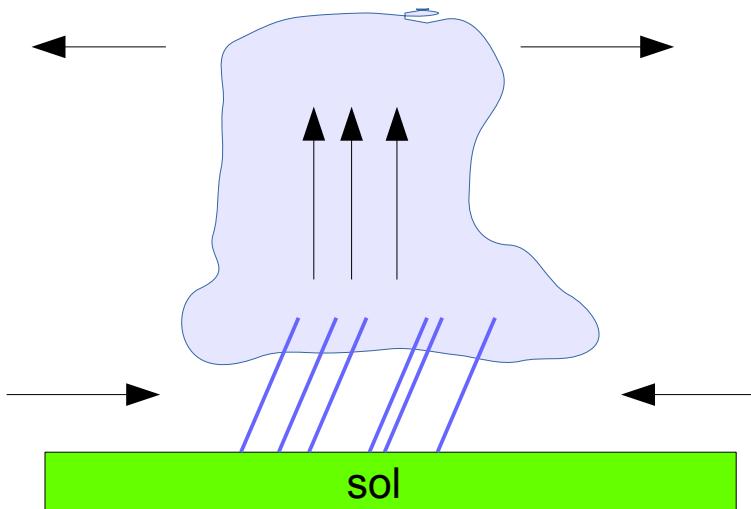
- vent horizontal par rapport au sol
- gradient 'horizontal' de la pression
- évolution météo lente par rapport à la rotation de la Terre
- frottements négligeables



Processus dominants en météorologie

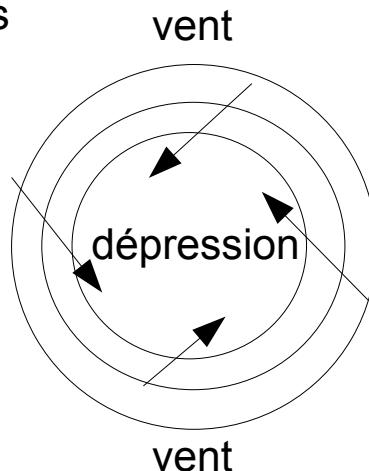
condensation de l'eau:

- la température diminue (en général) si on monte
- la solubilité de la vapeur diminue si la température baisse
- donc, lorsque de l'air humide monte, l'eau se condense (et libère sa chaleur latente)
en jargon météo, c'est la **convection**



pompage d'Ekman:

- en présence de frottement au sol
- convergence dans les dépressions
- donc, ascendances
- donc, nuages et pluie



Discrétisation temporelle

Conversion des équations continues aux dérivées partielles de type $dx/dt=F(x)$, en **opérateur d'avance temporelle** du type:

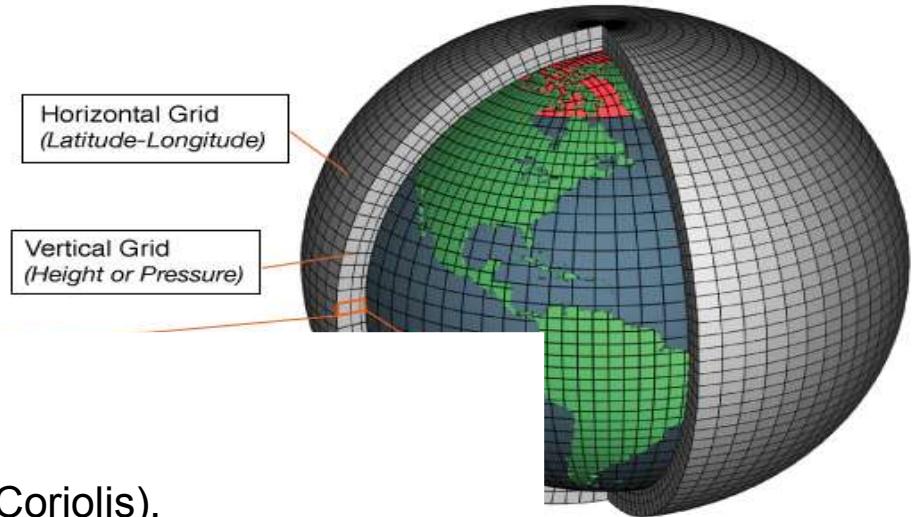
$$x[t+dt] = F(x[t])$$

où

- x est le *vecteur d'état*: toutes les valeurs des champs prédictifs du modèle, sur une **grille de discrétisation** finie. (exemple: $nx=ny=500$, $nz=100$, $nchamps=(u,v,w,T,q_v,q_l,q_i)$, $\dim x \sim 10^9$)
- dt est le *pas de temps* de discrétisation temporelle (ex: 1mn)

Faire une prévision ou une simulation numérique, c'est intégrer cet opérateur dans le temps.

Calcul pratique du modèle



Simplifications des équations:

- terre ellipsoïdale
- couche mince (=horizontalité de la force de Coriolis),
- hypothèse hydrostatique $dp = -\rho g dz$ (= accélération verticale faible),
- pentes faibles

Choix d'une grille de discréttisation 3D:

- **Discréttisation horizontale:**
 - sur une grille sphérique (grille lat/lon, icosahédrique, grille de Gauss, projection Lambert...)
 - ou éléments finis, Fourier...
- **Discréttisation verticale:**
 - épousant le relief ($dz \sim 100m$, $dx \sim 1km$, cf. rapport d'aspect des structures météorologiques)
 - base $\sim 2m$, sommet $\sim 40km$ (haute stratosphère)

Choix des résolutions de grille en fonction des objectifs

Le coût numérique d'une prévision est proportionnel:

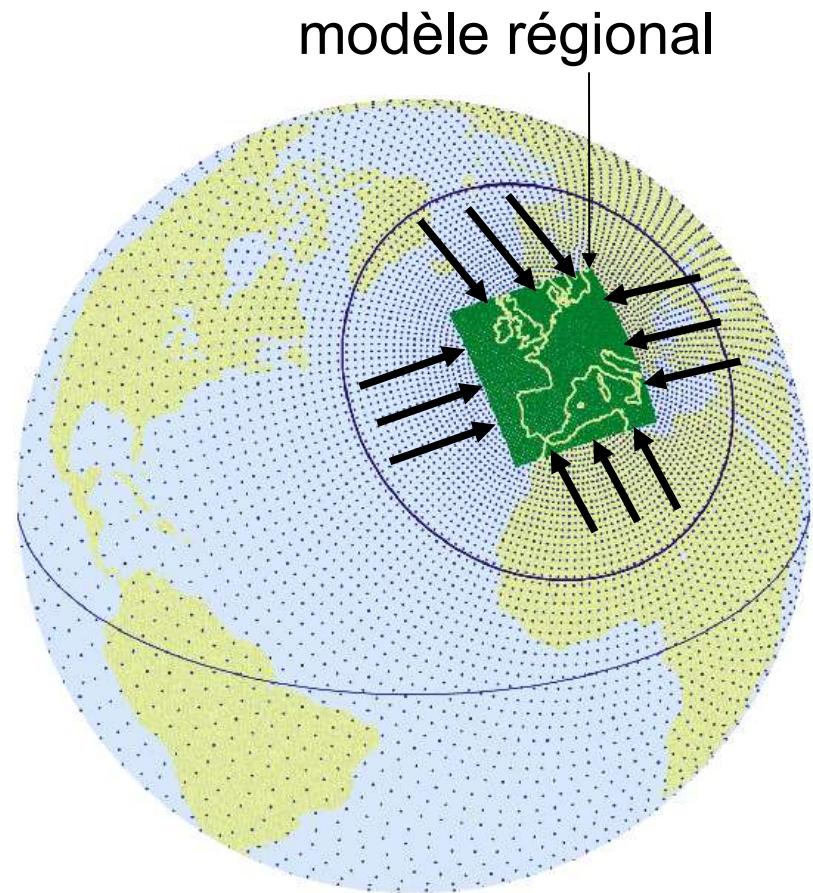
- à l'horizon de prévision
- au cube de la résolution horizontale

Prévision globale:

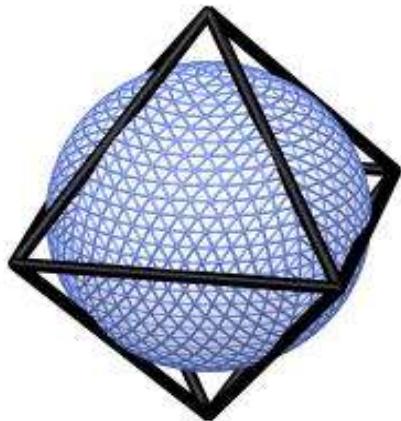
- horizon 3-15j: $dx \sim 15\text{km}$
- horizon 6 mois: $dx \sim 50\text{km}$
- climat (50ans): $dx \sim 70\text{km}$

Prévision régionale:

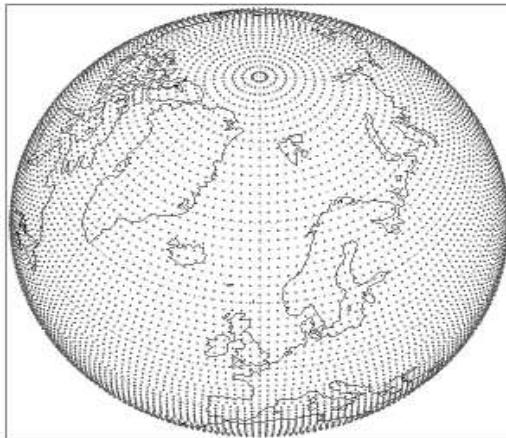
- horizon 48h: $dx \sim 1\text{km}$
- latéralement couplée à un modèle global



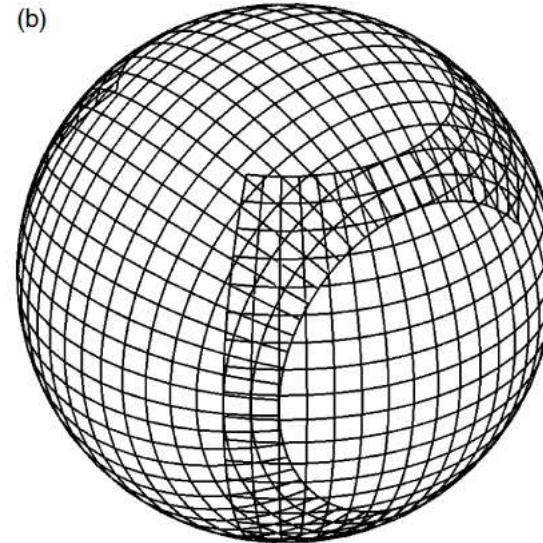
Quelques géométries de grille globale



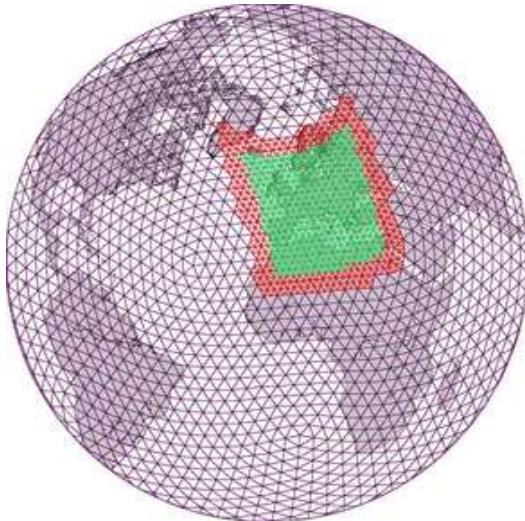
octaédrique



Gaussienne



Yin-Yang



icosaédrique à raffinement local

critères:

- parallélisation des calculs
- précision des intégrales/dérivées locales
- facilité de programmation

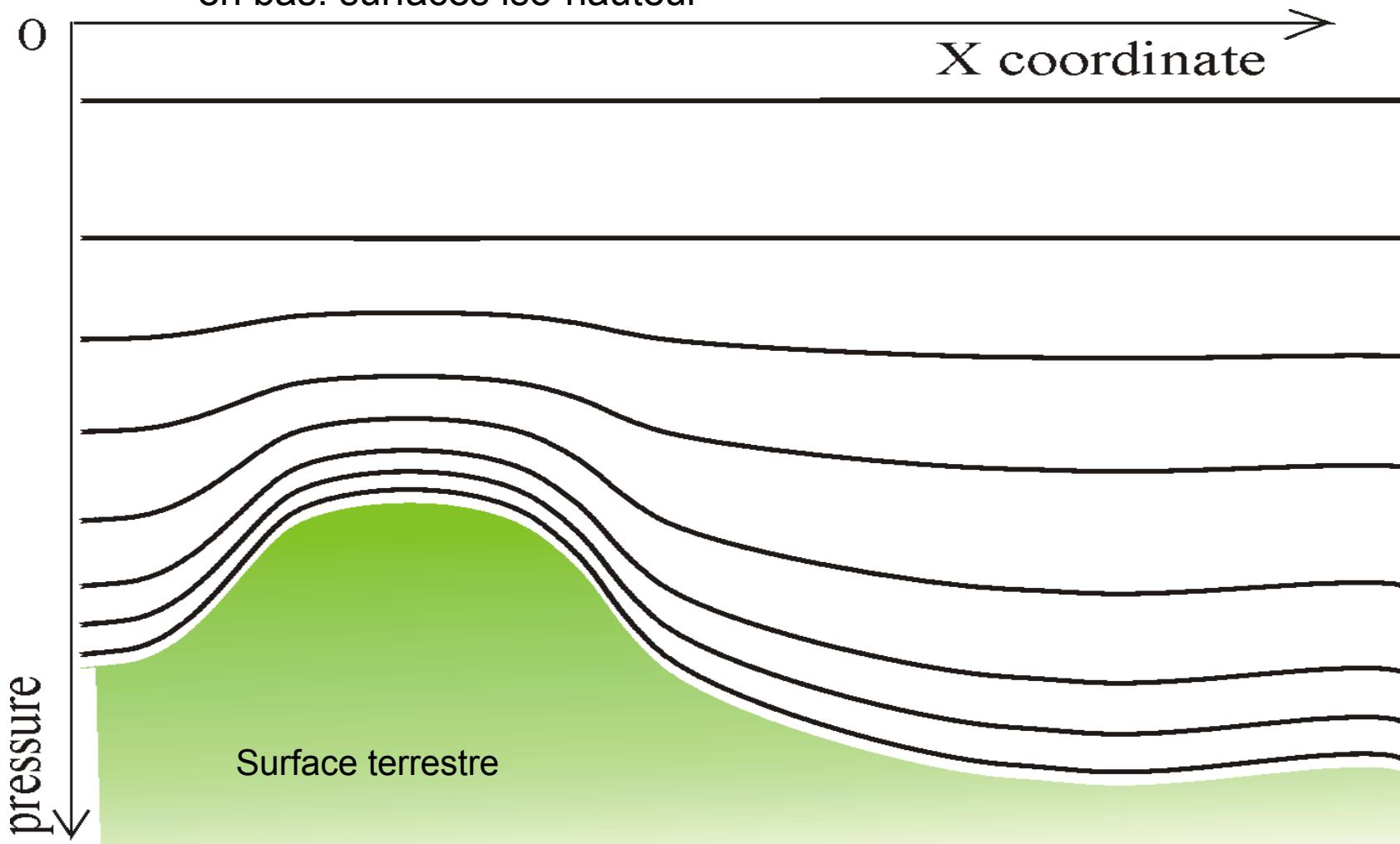
exemple de discréétisation verticale

Modèles Arpège/IFS

$$p_k = a_k + p_{\text{sol}} \cdot b_k \quad \text{"coordonnée pression hybride"}$$

en haut: surfaces iso-p

en bas: surfaces iso-hauteur



la discréétisation du transport

la grille du modèle ne suit pas le vent, il faut donc calculer l'effet du transport à chaque pas de temps et sur chaque point de grille.

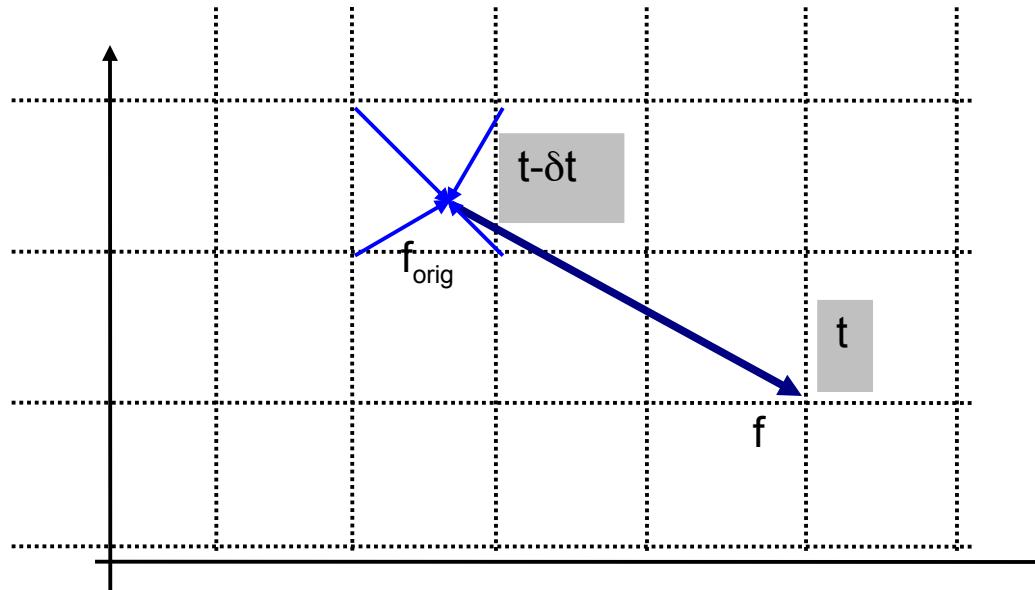
1) technique eulérienne:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -U \frac{\partial f}{\partial x} \quad \text{où } f = \text{vent, température, etc.} \quad U = \text{vent}$$

2) technique semi-Lagrangienne:

$f(t) = f_{\text{orig}}(t - \delta t)$: transport le long de la trajectoire locale du fluide jusqu'au point de grille cible

Un codage astucieux permet d'obtenir des critères de Courant ($C \delta t / \delta x$) de l'ordre de 5 à 10



Autres contraintes de discréétisation

Schéma temporel: intégration de $dx/dt = F(x)$

stabilité critique pour les ondes les plus rapides (sonores) et les mailles les plus fines (près du sol)

2 . solutions:

1) schéma de Runge-Kutta d'ordre élevé en dt

2) schéma semi-implicite stabilisateur:

$$[x(t+dt) - x(t-dt)] / 2 dt = [F(x[t+dt]) + F(x[t-dt])] / 2$$

→ à chaque pas de temps, résoudre une équation elliptique 3D en $x(t+dt)$, solution spectrale directe ou minimisation itérative.

Calcul de dérivées spatiales:

1) différences finies sur points de grille voisins:

$$df/dx \sim [f(x+dx) - f(x-dx)]/2dx$$

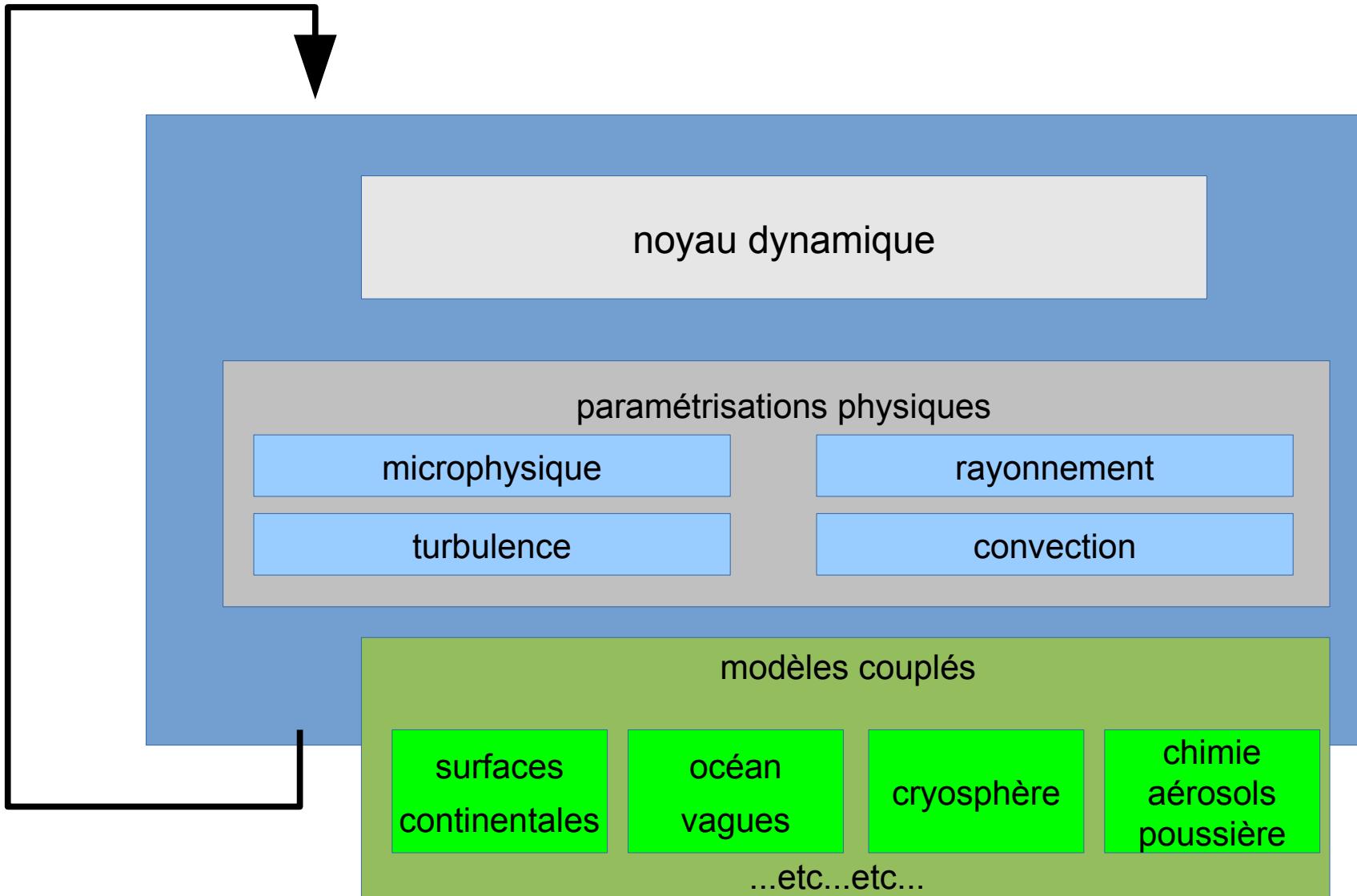
2) représentation spectrale (Galerkin): dériver la transformée de Fourier

$$f(x) = \sum_k f_k \exp(jkx)$$

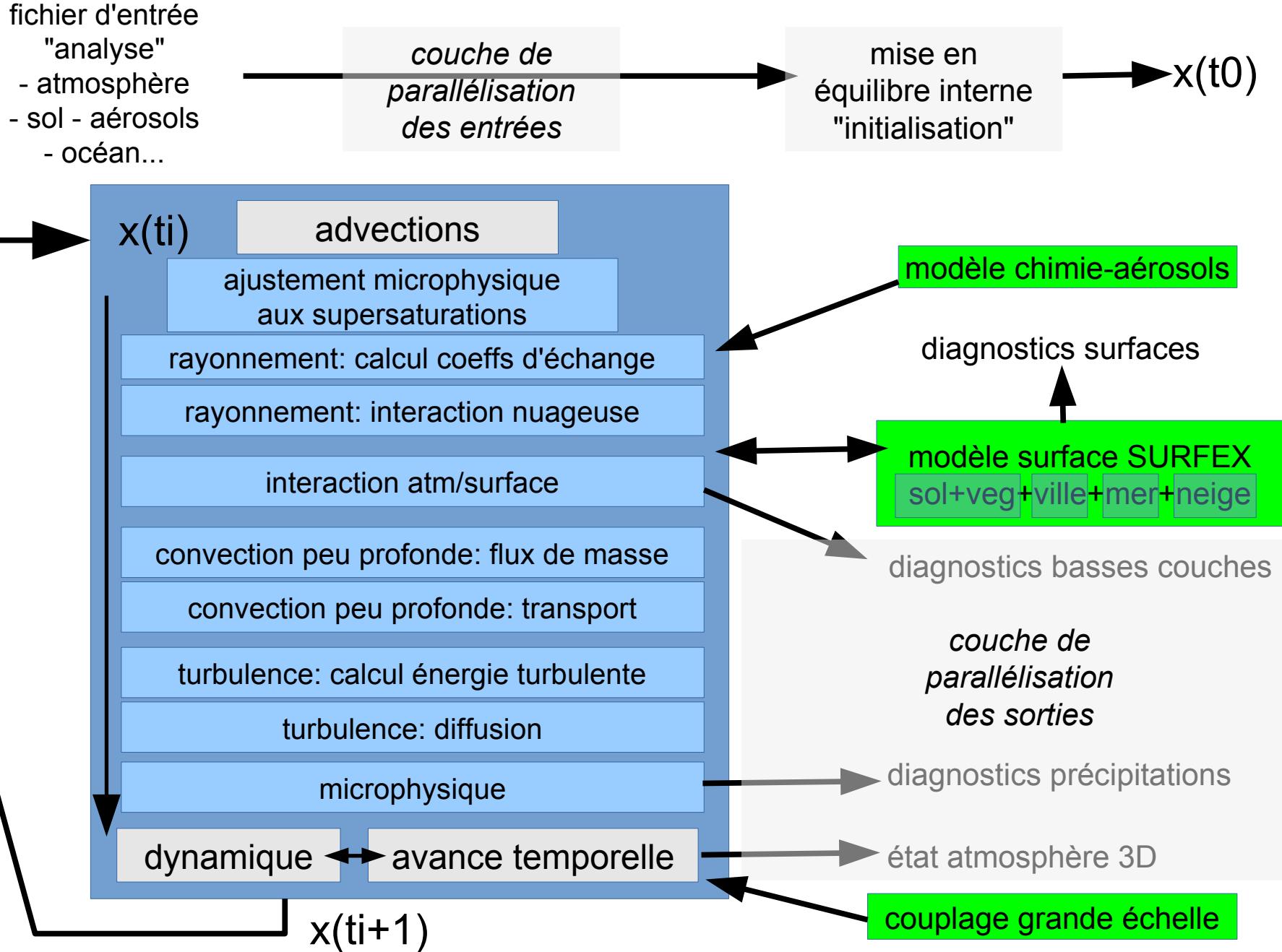
3) éléments finis (en micrométéorologie)

Structure du pas de temps d'un modèle

$$x(t) \rightarrow x(t+dt)$$

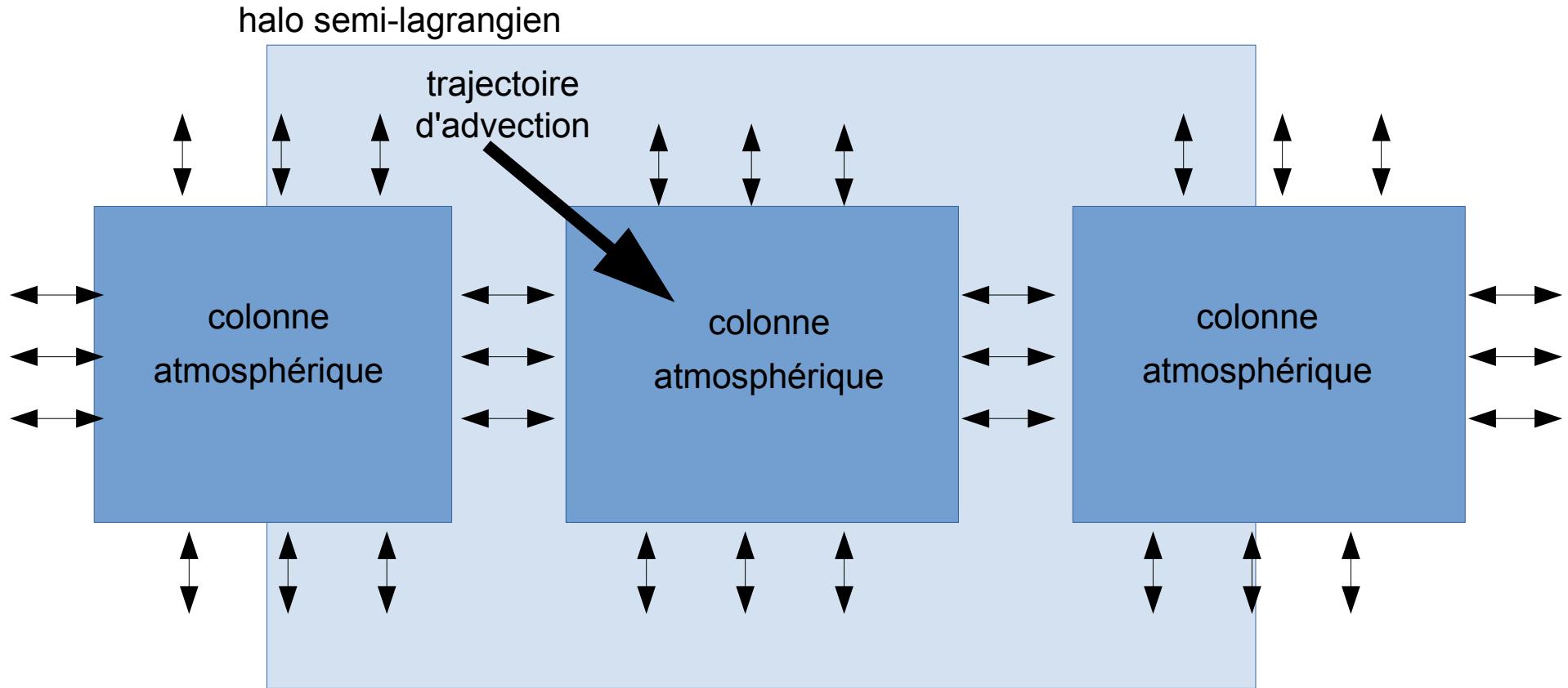


Structure logicielle d'un modèle (CRM AROME)



Parallélisation d'un modèle: des milliers de CPUs

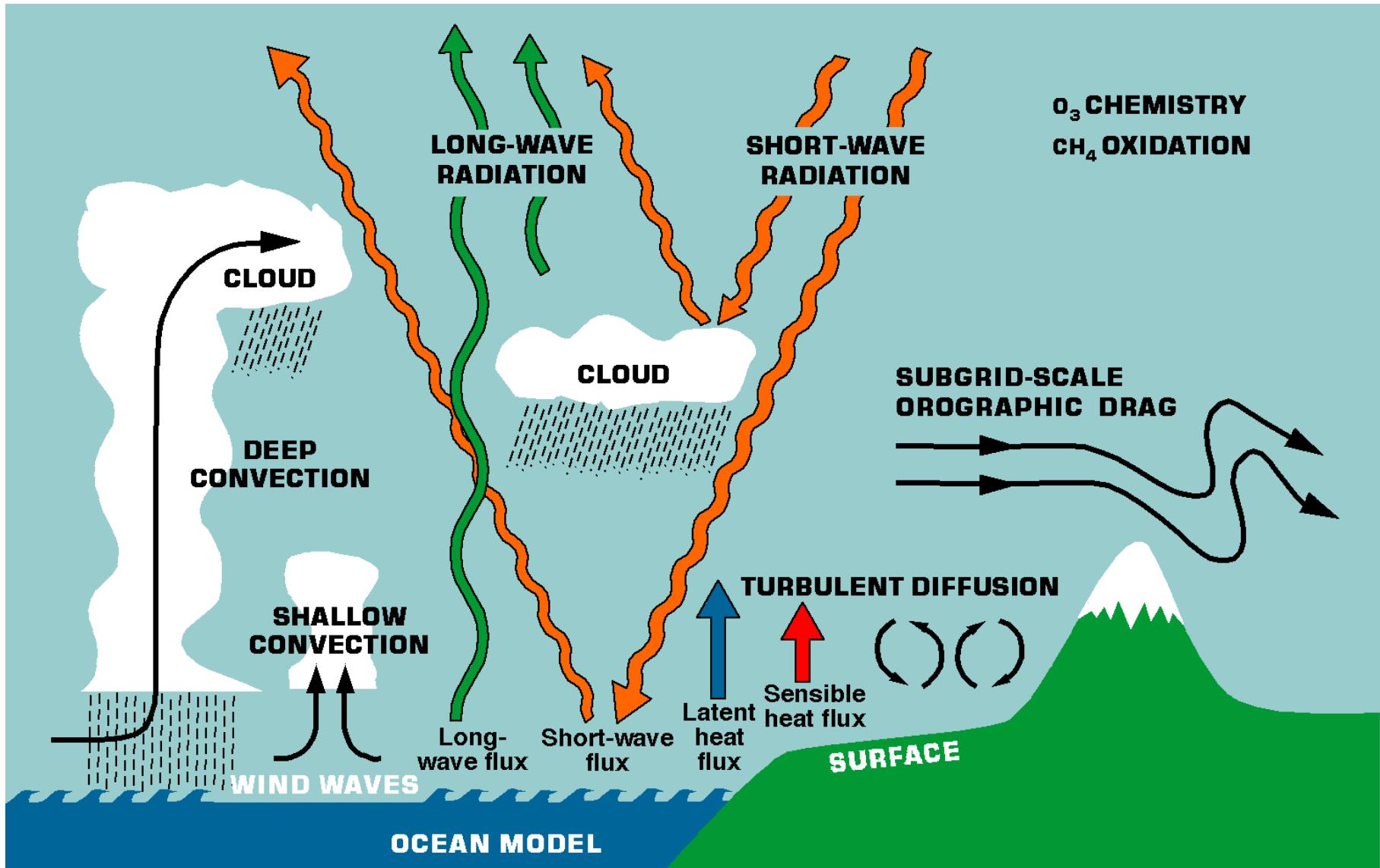
- calculs physiques **colonne par colonne**, parallélisation OpenMP dedans
- communication latérale MPI pour l'advection: halo géographique
- transposition globale MPI de U V T pour les calculs dynamiques (laplacien, **équation elliptique** d'avance temporelle semi-implicite)
- parallélisation des entrées/sorties et des couplages: "serveur d'E/S" asynchrone
- sur GPU: parallélisation spécifique (CUDA)



Paramétrisations physiques

- termes supplémentaires dans les équations d'évolution
- représentent l'effet du manque de résolution et des influences externes (soleil, ozone, végétation, nuages...)
- vaste sujet à la frontière de nos connaissances de l'environnement
- essentielles pour les **basses couches, nuages, précipitations, grandes ondes planétaires** (zones tropicales, prévisions à longue échéance)
- représentent ~50% du coût d'une prévision

Paramétrisations : principaux phénomènes à prendre en compte



Principales paramétrisations atmosphériques

rayonnement:

- chauffage solaire, interaction avec nuages, surfaces, aérosols...
- différentes longueurs d'onde: visible, UV, ...

microphysique nuageuse:

- condensation/évaporation de l'humidité en gouttelettes, glace... nuageuses, échanges de chaleur latente
- formation et chute de pluie, neige, grêle...

flux de surface:

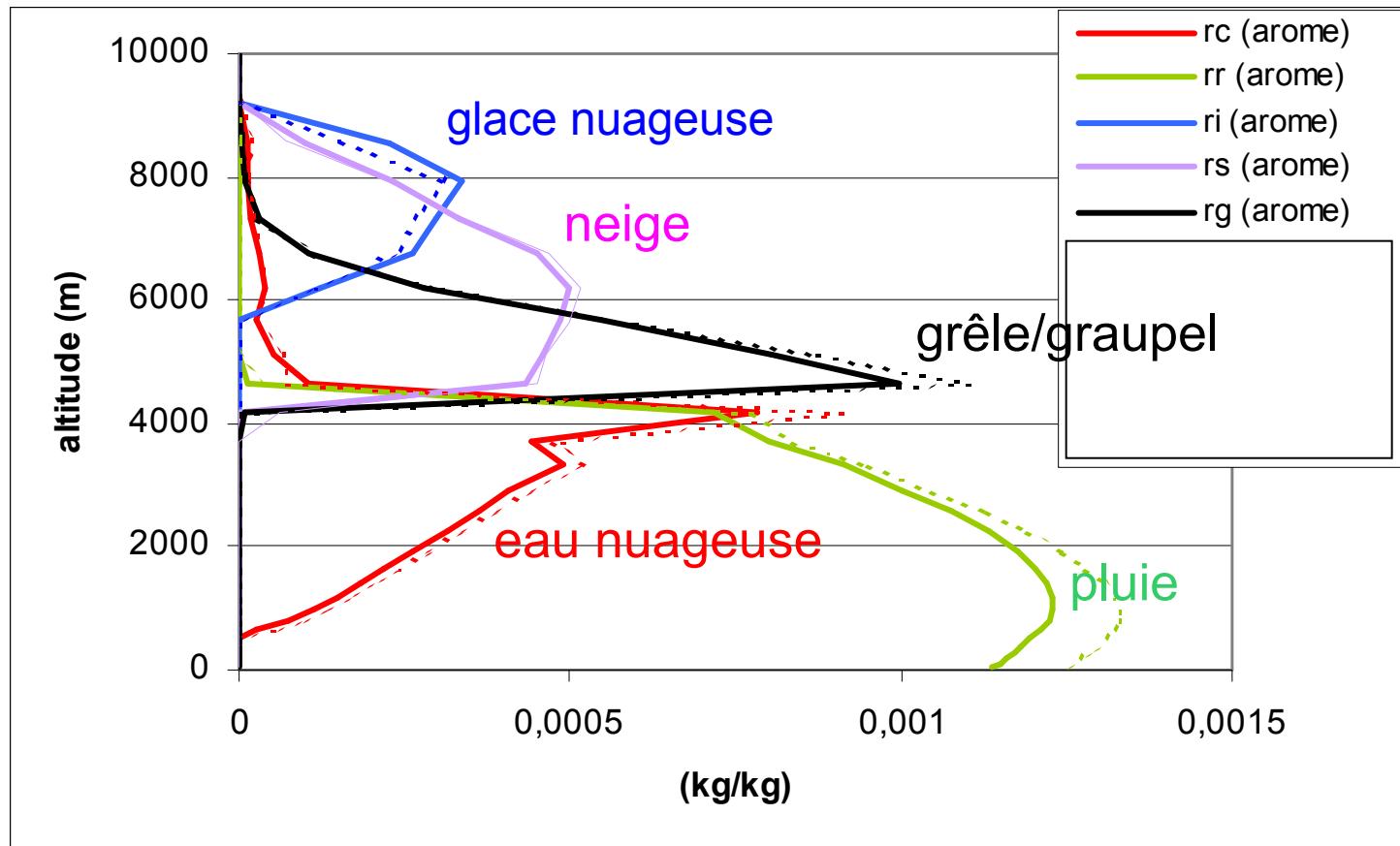
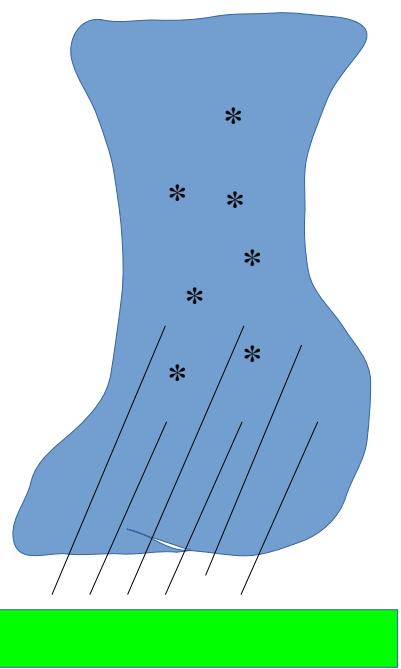
- évaporation/chauffage sur sol, végétation, neige, océans...
- hydrologie de surface
- rugosité, vagues

turbulence:

- mélange dû aux tourbillons sous-maille
- condensation nuageuse sous-maille

convection précipitante sous-maille (modèles à basse résolution uniquement)

Structure verticale d'un cumulonimbus avec 5 espèces microphysiques

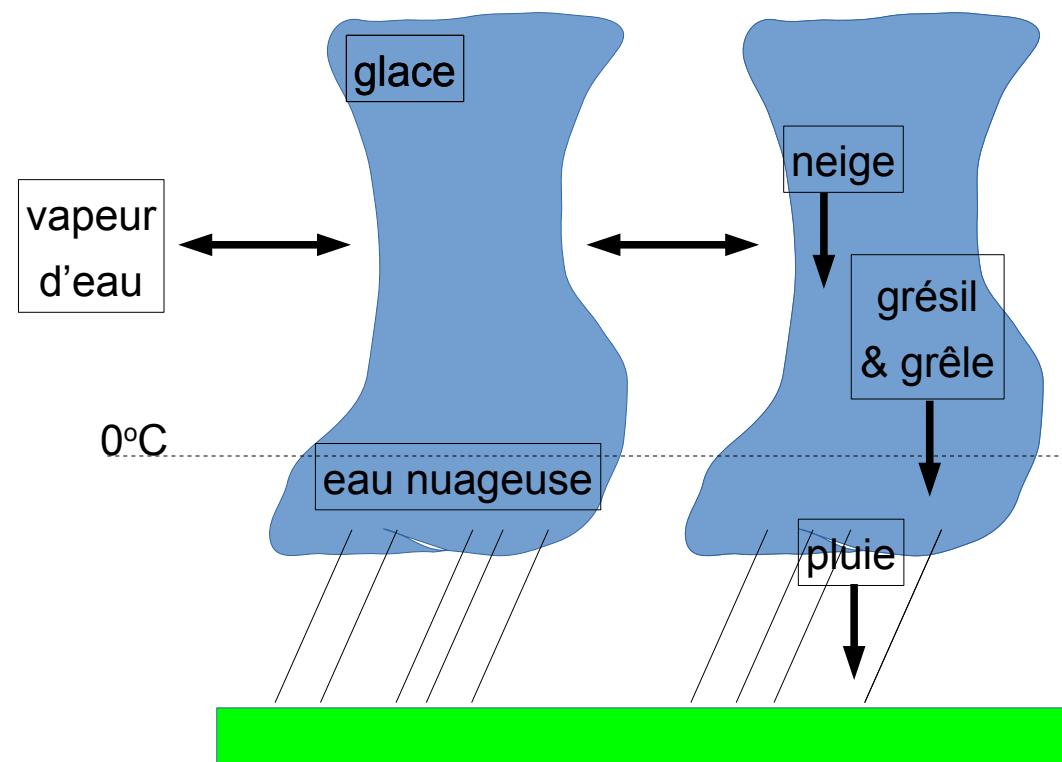


Microphysique nuageuse

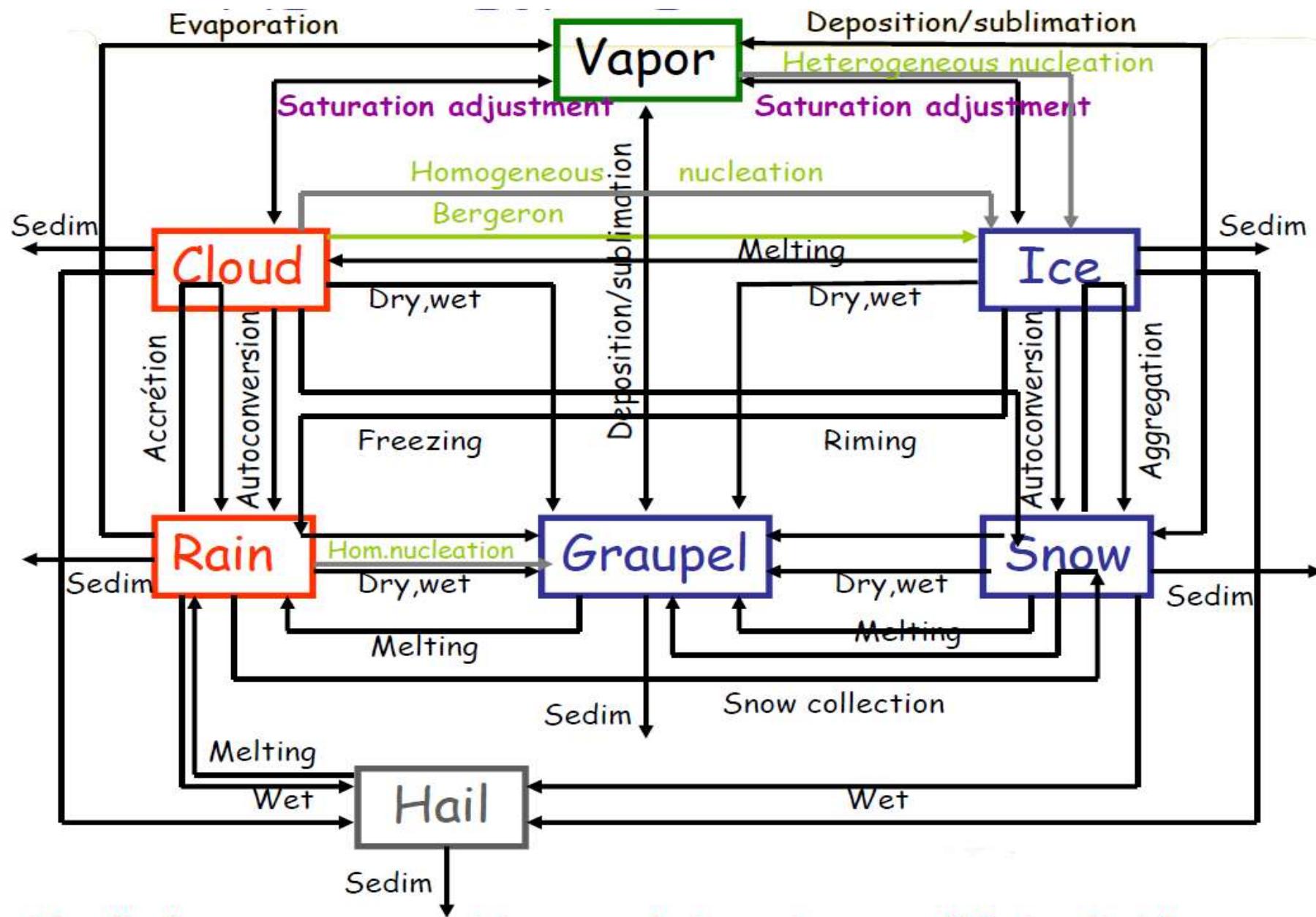
changements de phase de l'eau:

- vapeur / liquide / glace
- particules nuageuses / précipitantes, à surface liquide ou solide
- distribution des tailles de particules, vitesses de chute
- cinétique des transformations
- interactions avec la température (chaleur latente), les aérosols, le rayonnement, les surfaces...

exemple: schéma ICE3 à 5 espèces condensées

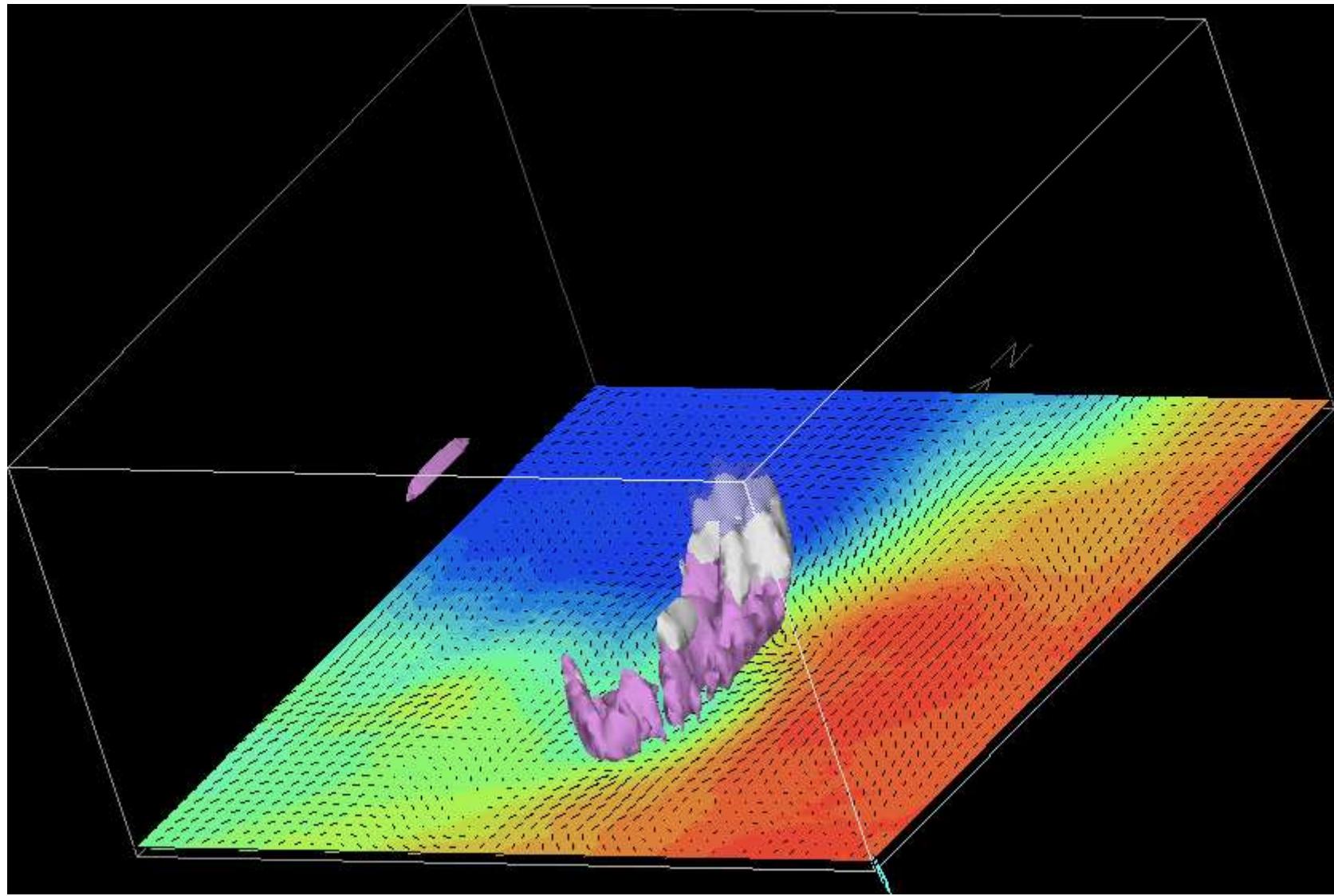


Microphysique nuageuse (simplifiée)



Modélisation de nuages convectifs

Exemple de prévision d'un système d'orages par Arome, sur l'Île de France,



Paramétrisation de la turbulence

But: représenter l'effet des mouvements atmosphériques sous-maille.

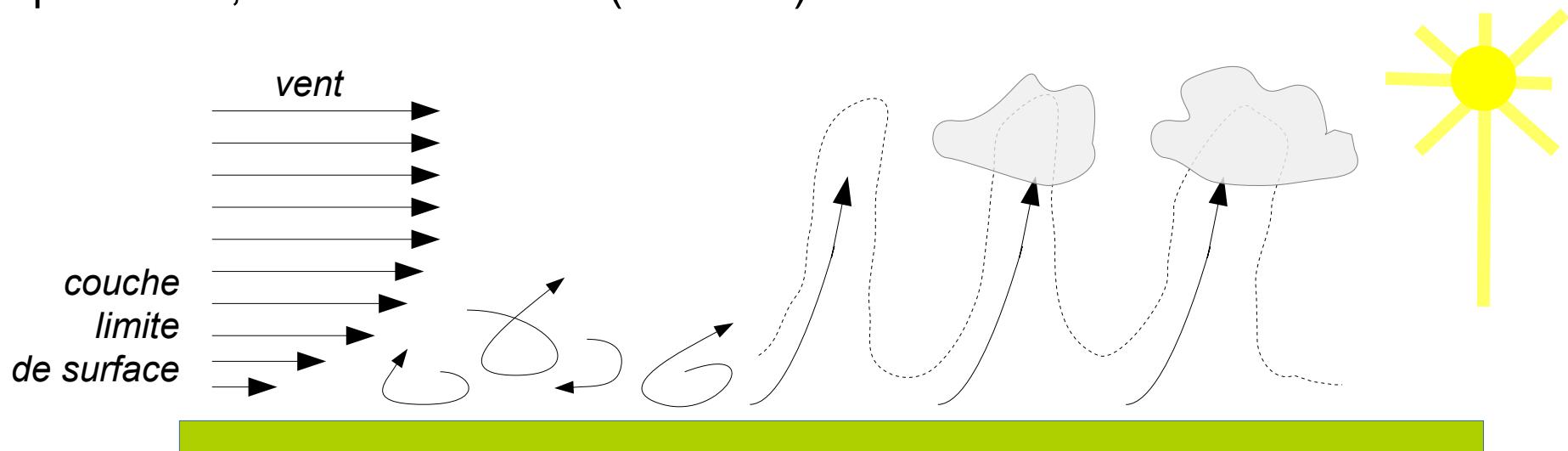
Mélange par les petits tourbillons : ressemble à une **diffusion verticale**

ex: $\partial q / \partial t = -K \partial^2 q / \partial z^2$

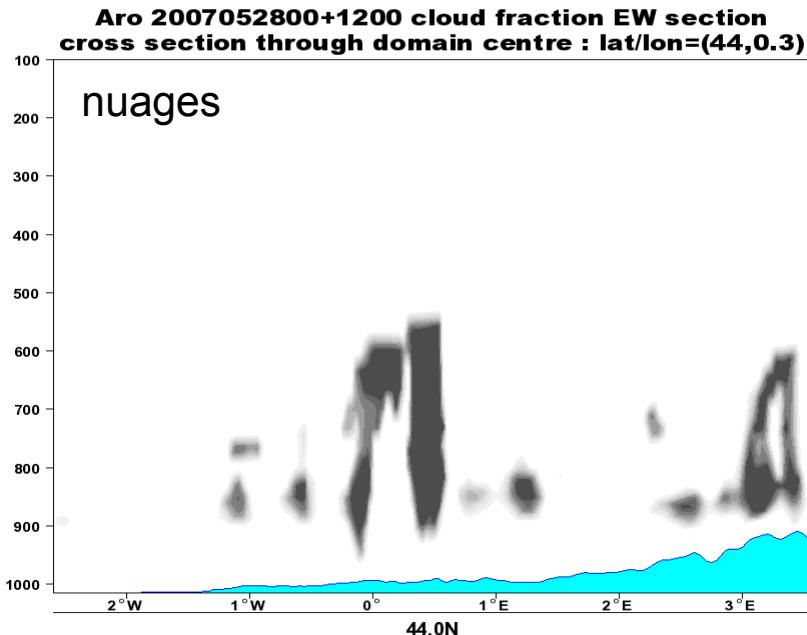
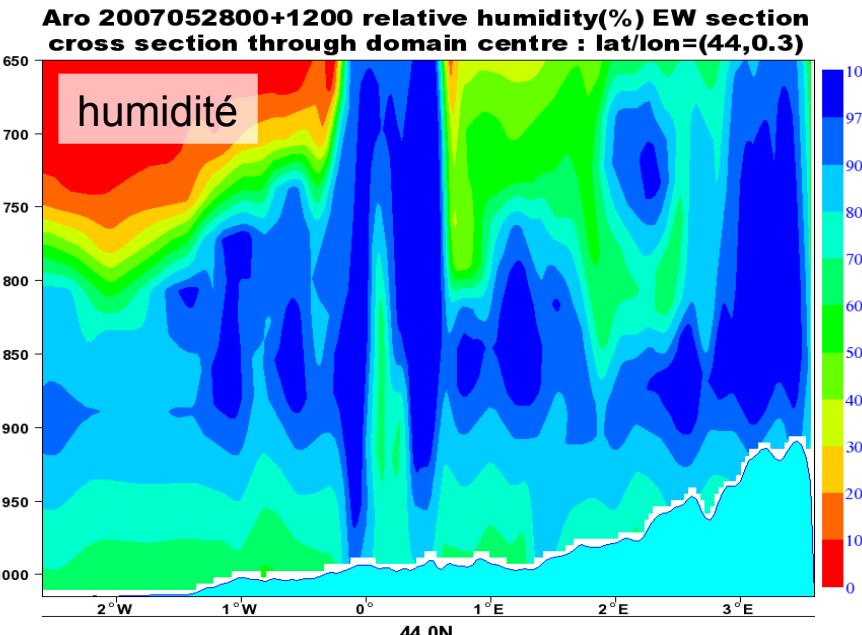
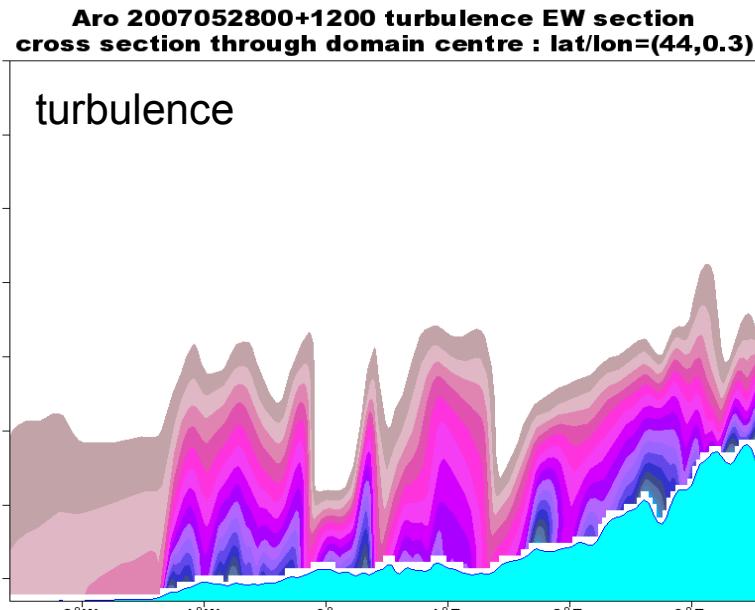
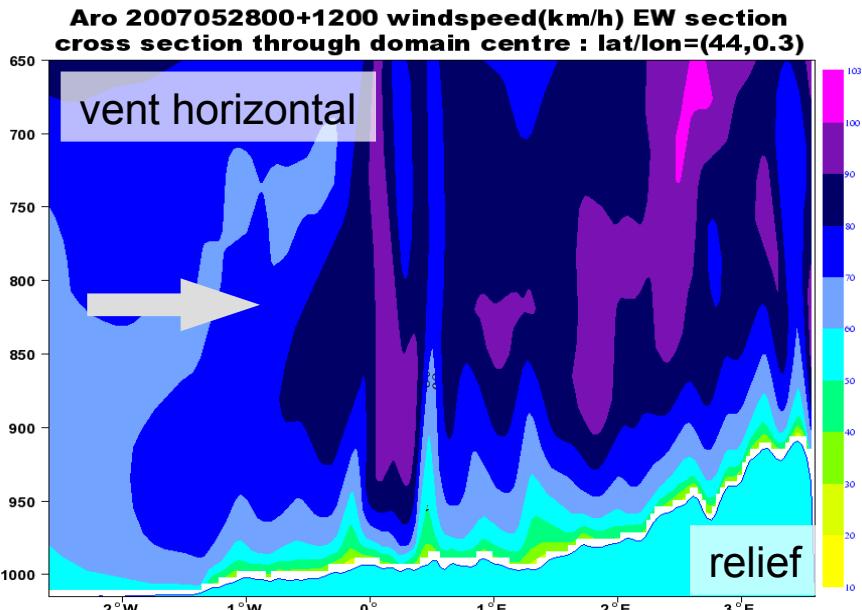
q : n'importe quelle variable (vent, T, humidité, polluant...)

K : coefficient fonction du cisaillement et de la stabilité verticale $\partial T / \partial z$

Convection sous-maille : "thermiques" = transport vertical par des panaches, secs ou humides (cumulus)

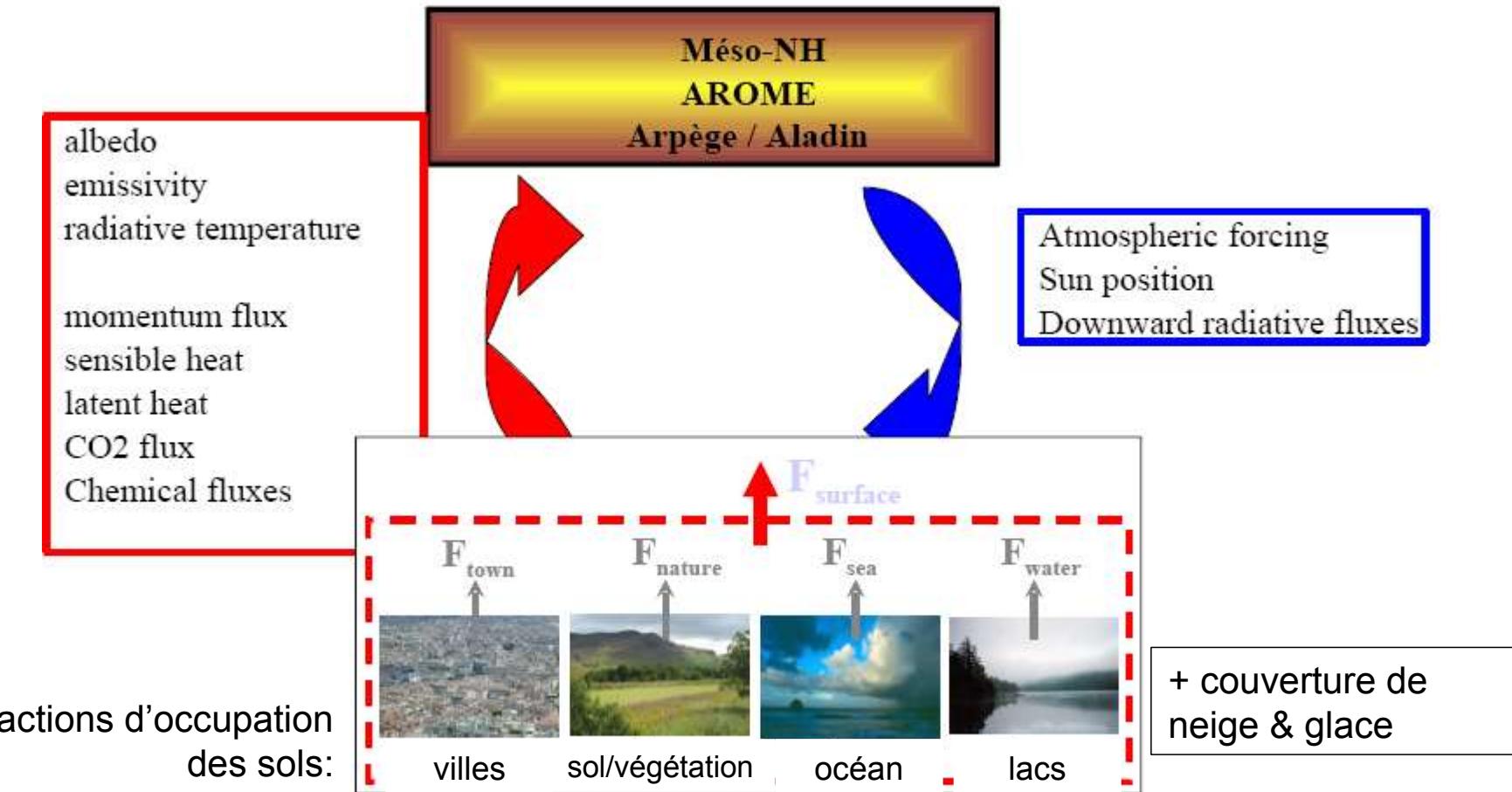


Effet combiné des paramétrisations: structuration d'une couche limite nuageuse (en coupe verticale)



Paramétrisation des flux de surfaces : 4 principaux types par maille atmosphérique

Exchanges of flux and atmospheric forcing at each time step



Surfex output as surface boundary conditions for atmospheric radiation and turbulent scheme (additional output needed for the convection scheme)

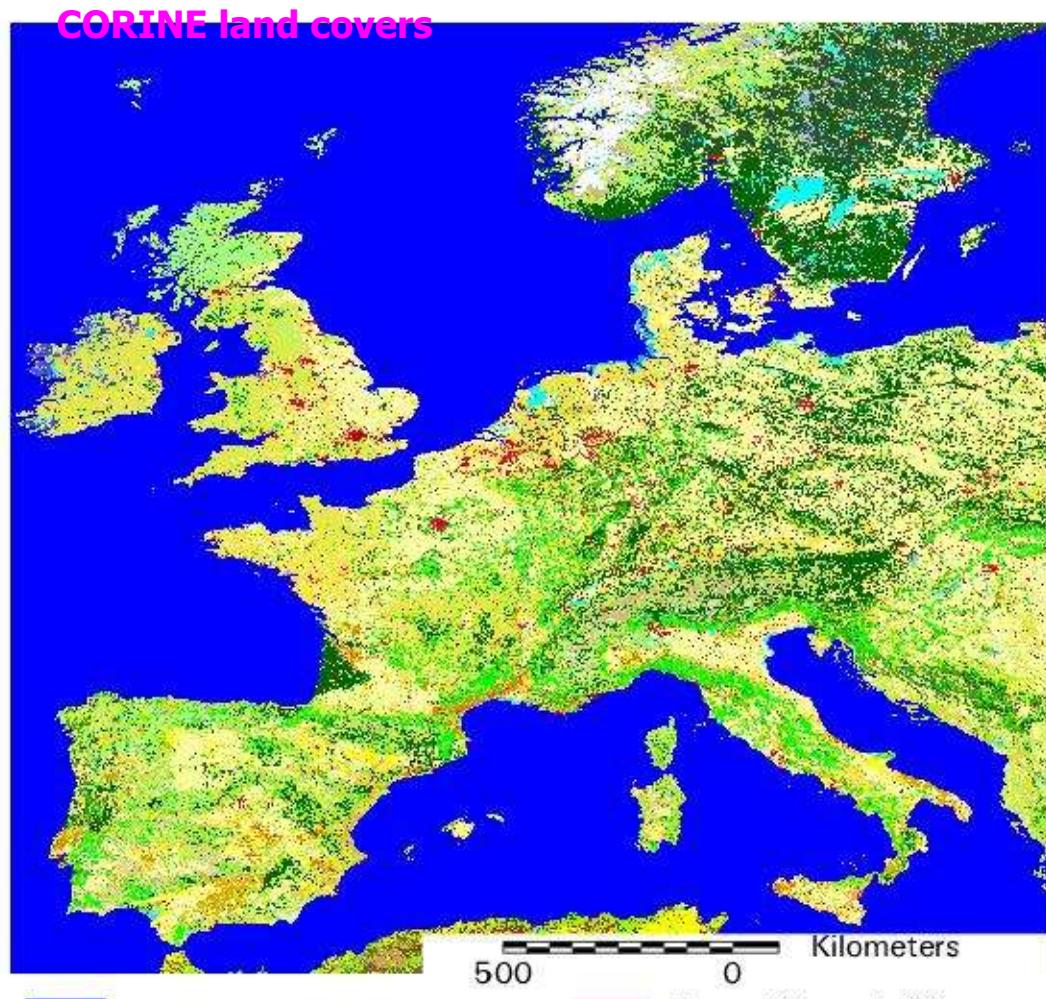
Bases de données géographiques pour identifier les types de surfaces et leurs variations (ex: végétation)

Surface physiography (TEB, ISBA) from Ecoclimap classification (Masson. 2003)

242 cover types

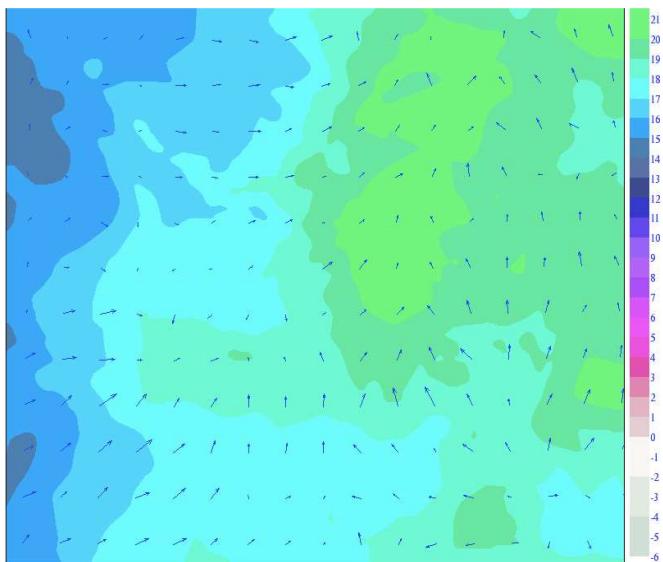
+

250m-resolution
cover fractions

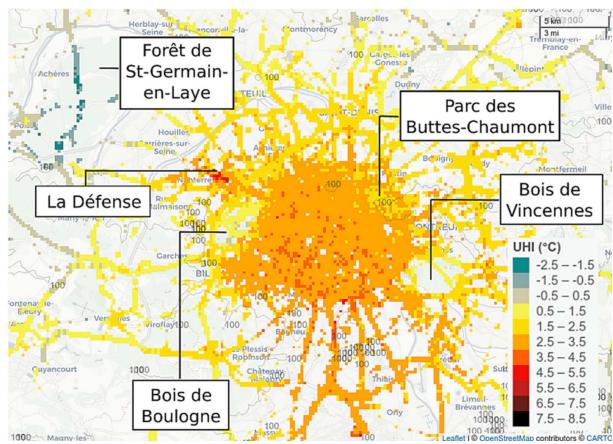


Le rôle de l'urbanisation sur la météorologie des mégapoles

T simulée (modèle dx=2km)



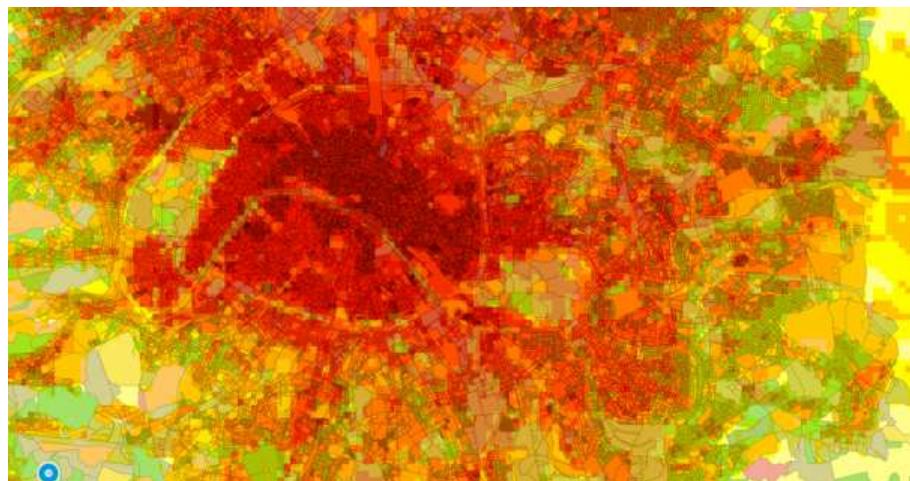
obs voitures PSA connectées



géographie d'occupation des sols



T nocturnes simulées (modèle dx=250m)



M2 - F Bouttier

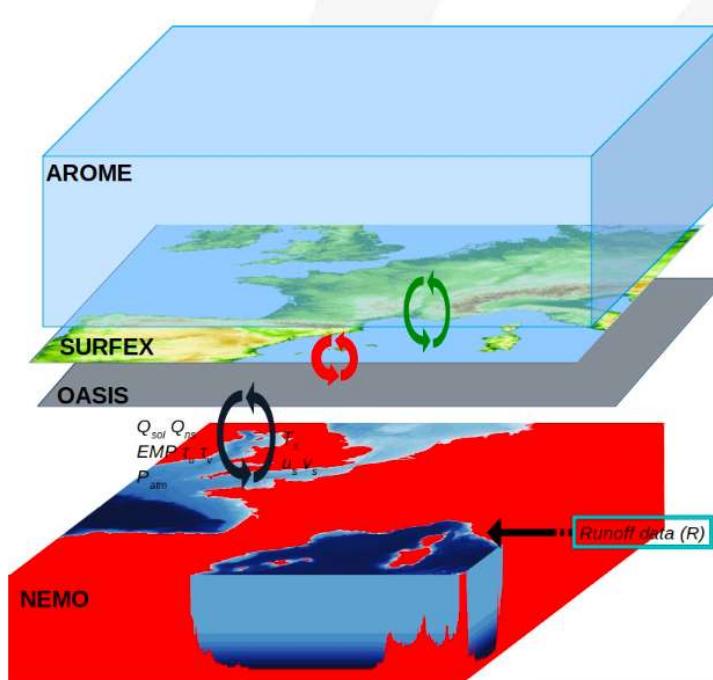
Modèles couplés

Certaines paramétrisations très complexes ne sont pas intégrées aux modèles atmosphériques, ce sont des modules couplés en provenance de laboratoires spécialisés: 'Earth Model'

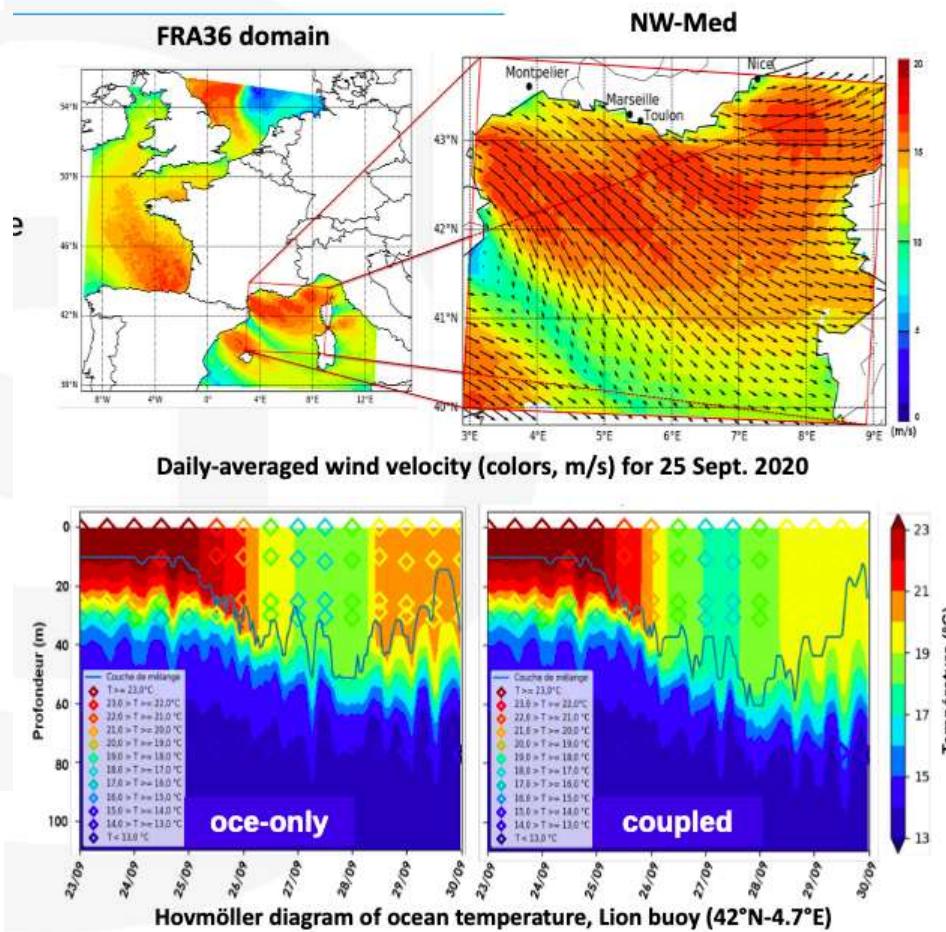
- **Surface terrestre:** sols, végétation, hydrologie, villes, CO₂
- **Océan:** vagues, circulation océanique, banquise
- **Chimie:** gaz/aérosols avec centaines d'espèces
 - + Poussière/sable/cendres volcaniques
 - + Feux de forêt, foudre
- etc...

Modèles couplés : océan/atmosphère

atmosphère 3D + vagues 2D + océan 3D

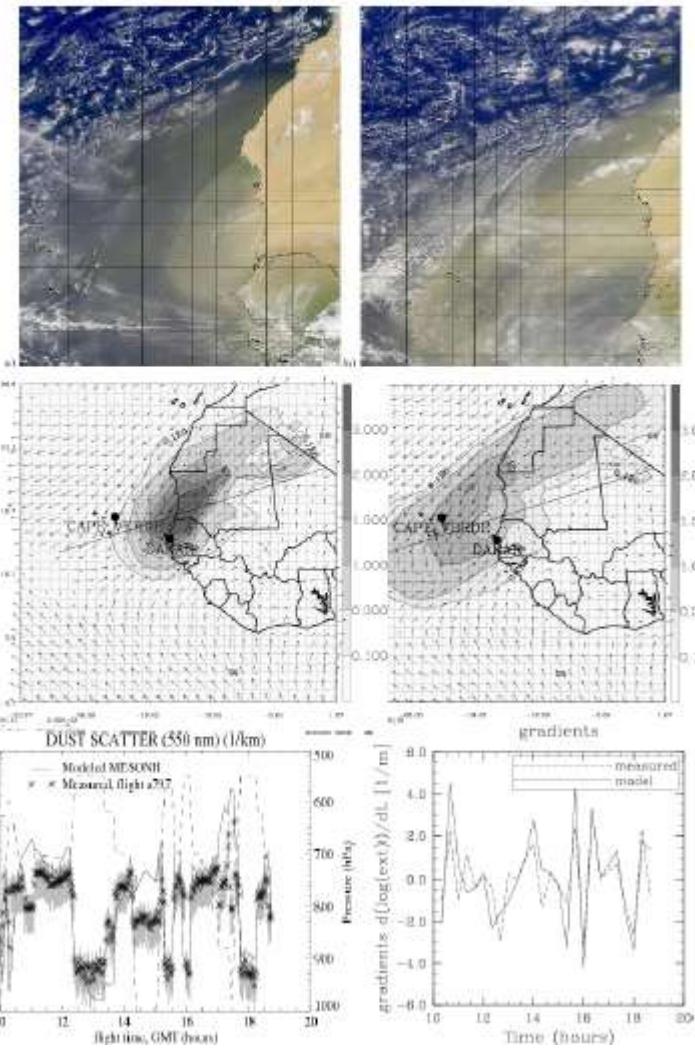
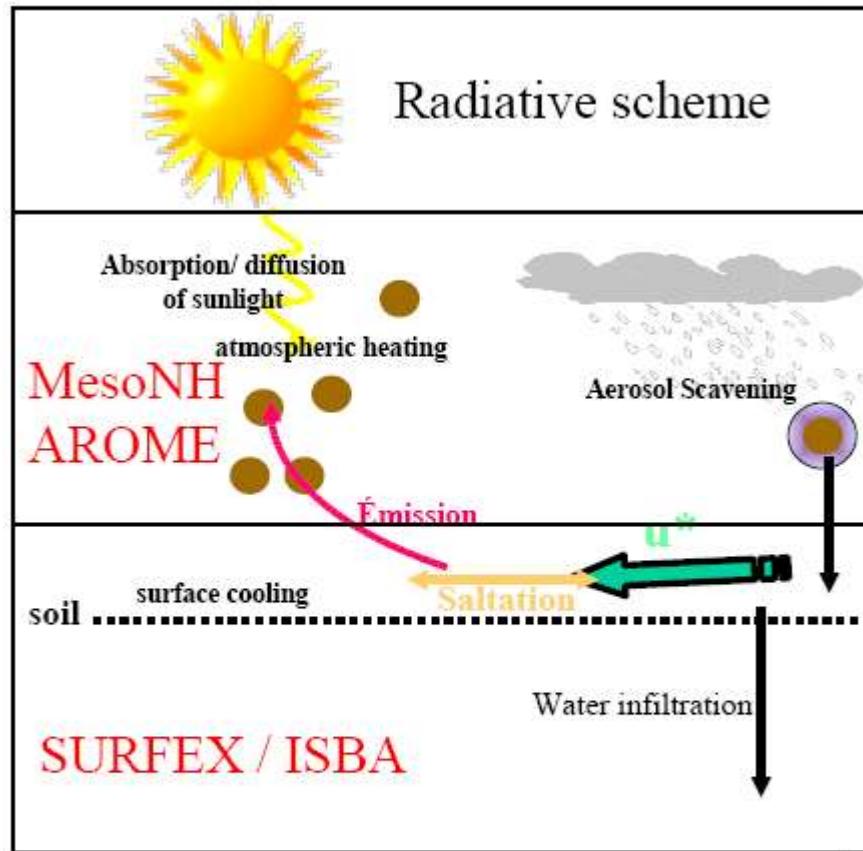


AROME-FR (c43t2, 1.3km, 90 η -levels, $\Delta t=50s$)
NEMO-FRA36 (v4.2, 1/36° ORCA grid, 50 z-levels, $\Delta t=150s$)



Modèles couplés : météo 3D / poussières 3D

sources + puits + transport 3D + effet radiatif



*et encore plus de couplages
dans les modèles de climat*