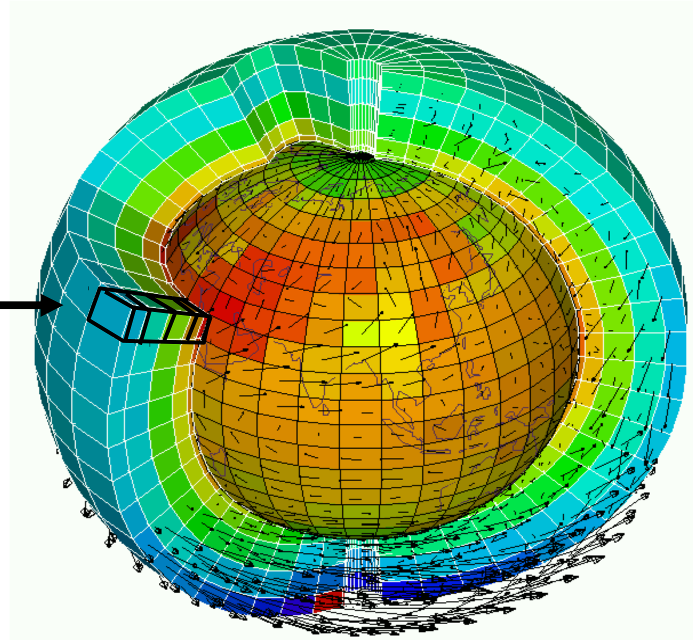


Modèles numériques du climat =

• Equations issues de la mécanique des fluides mises en oeuvre sur un ordinateur (dimension finie)

• **Représentation approchée des processus non résolus explicitement au travers de « paramétrisations »** (rayonnement, nuages, turbulence, surfaces, ...)

Plan de l'exposé :

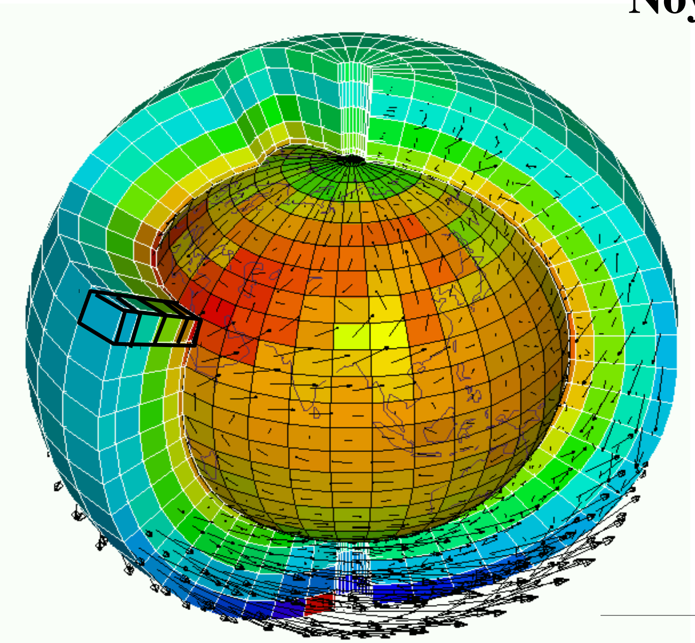
I Définition et principes

II Exemples

III Illustration de la méthodologie de développement et d'évaluation sur des développements en cours

Frédéric Hourdin. Travail développé par l'équipe LMDZ

I. Principes



Noyau dynamique : équations de bases discrétisées sur la sphère

- Conservation de la masse

  $D\rho/Dt + \rho \, \mathrm{div}\underline{U} = 0$
- Conservation de la température potentielle

  $D\theta / Dt = Q / Cp \ (p_0/p)^\kappa$
- Conservation de la quantité de mouvement

  $D\underline{U}/Dt + (1/\rho)\, \underline{\mathrm{grad}p} - \underline{g} + 2\, \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$
- Conservation des composants secondaires

  $Dq/Dt = Sq$

Objet des paramétrisations : rendre compte de l'effet des processus non résolus par ces équations

→ **Termes « sources » additionnels dans les équations.**

- *Q* : Chauffage par échanges radiatifs, conduction (négligée), condensation, sublimation, **mouvements sous maille (nuages, turbulence, convection)**
- $\underline{F}$: Viscosité moléculaire (négligée), **mouvements sous-maille (nuages, turbulence, convection)**
- *Sq* : condensation/sublimation (q= vapeur d'eau ou eau condensée), réactions chimiques, photo-dissociation (ozone, espèces chimiques), microphysiques et lessivage (aérosols de pollution, poussières, ...), **mouvements sous maille (nuages, turbulence, convection)**

Paramétrisations : principes




- Calcul de l'**effet collectif des processus non résolus sur les variables d'état explicites** ($\underline{U}$, θ, q) du modèle global

- **description physique approchée** du comportement collectif des processus

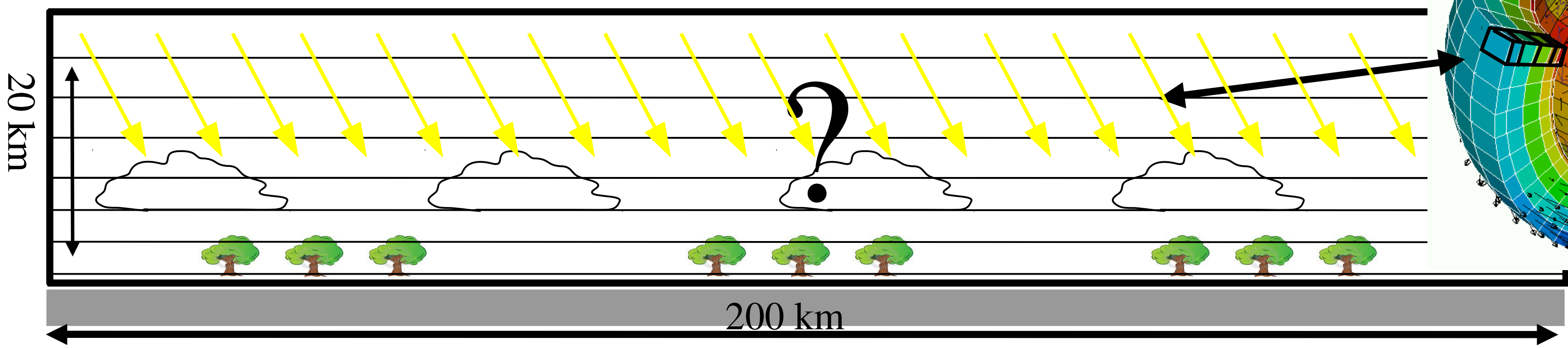
- qui fait intervenir des **variables internes aux paramétrisations** (caractéristiques des nuages, écart-type de la distribution sous-maille d'une variable, …)

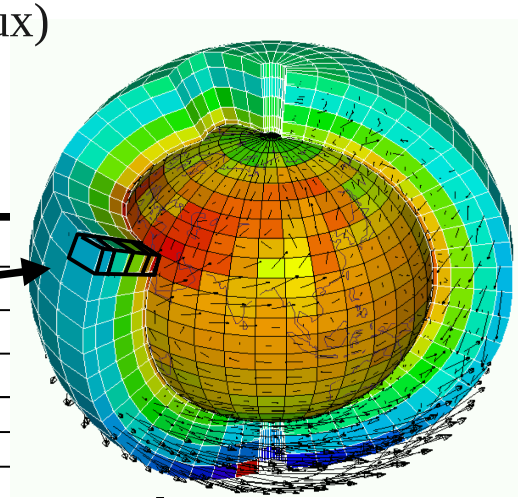
- dérivation d'**équations** reliant ces variables internes aux variables d'état

  $\underline{U}$, θ, q à l'instant t → **variables internes** → $\underline{F}$, Q, Sq → $\underline{U}$, θ, q à t+δt

- **hypothèses d'homogénéïté** (statistique) horizontale des processus représentés (comme dans l'hypothèse plan parallèle du transfert radiatif)
  → Equations uni-dimensionnelles en z (échanges verticaux)
  → Colonnes atmosphériques indépendantes

Dans une colonne du modèle ...

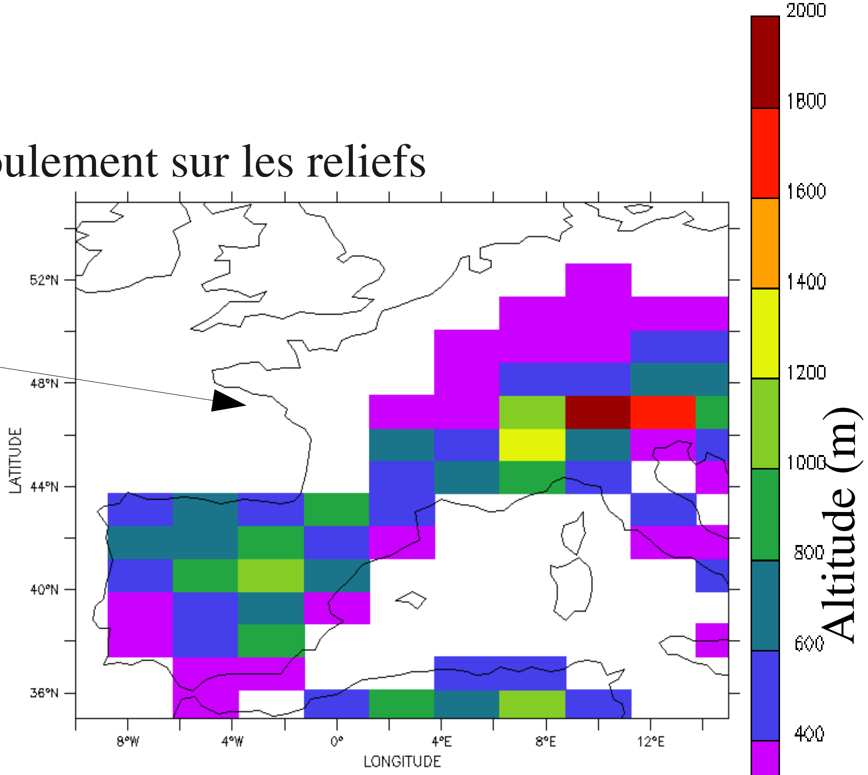




II. Exemples

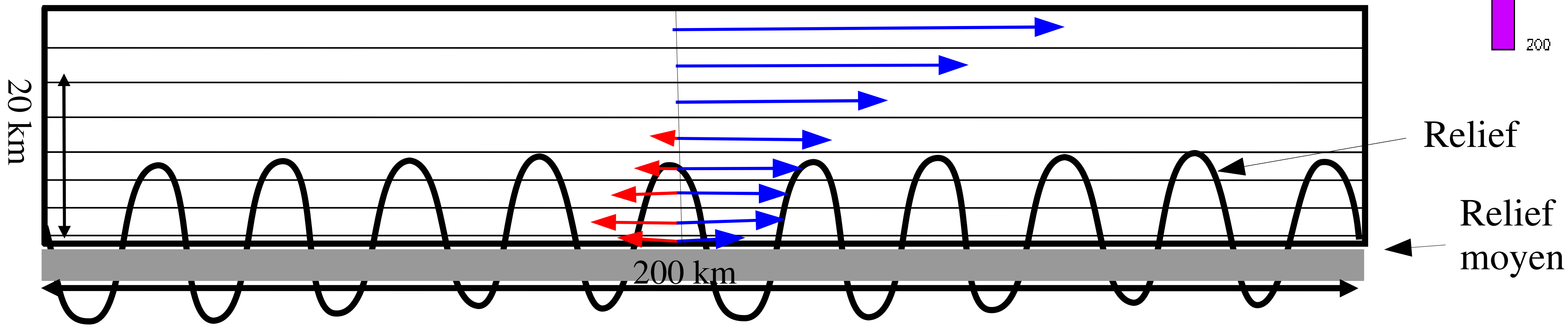
Un exemple de processus sous-maille : l'écoulement sur les reliefs

→ Le **relief moyen de la surface** intervient dans le noyau dynamique comme une condition à la limite inférieure
→ Ce relief moyen ne rend pas compte de la barrière que représentent les montagnes les plus hautes pour l'écoulement
→ Exemple simple de paramétrisation possible : introduction d'un terme de freinage dans les basses couches de l'atmosphère.



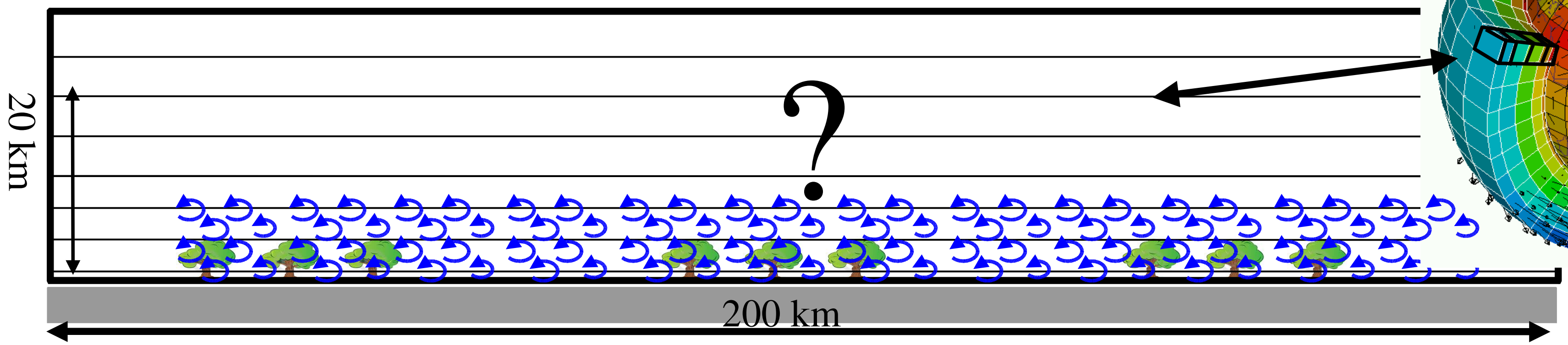
$$D\underline{U}/Dt + (1/\rho)\, \underline{\mathrm{grad}}\, p - \underline{g} + 2\, \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$$

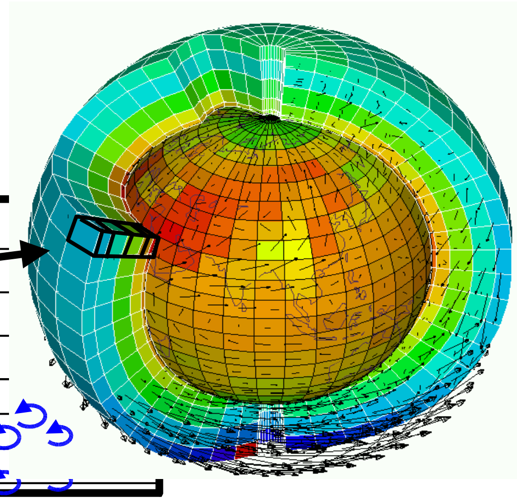
$$\underline{F} = -a(z)\, \underline{U}$$



Dans les modèles actuels, on rend compte en plus de :
→ l'injection d'ondes (de gravité) dans l'atmosphère
→ l'effet de détournement (portance) du relief
→ l'effet de la stabilité de l'atmosphère (franchissement plus facile dans une atmosphère moins stratifiée)

Dans une colonne du modèle ...





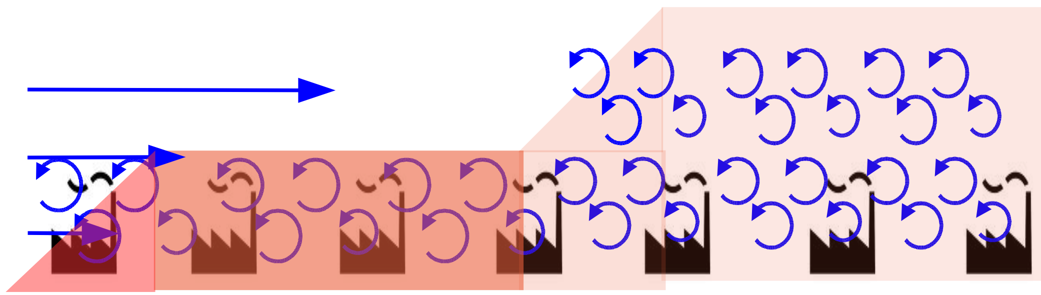
la turbulence

- Mouvements aléatoires de petite échelle (bourrasques)

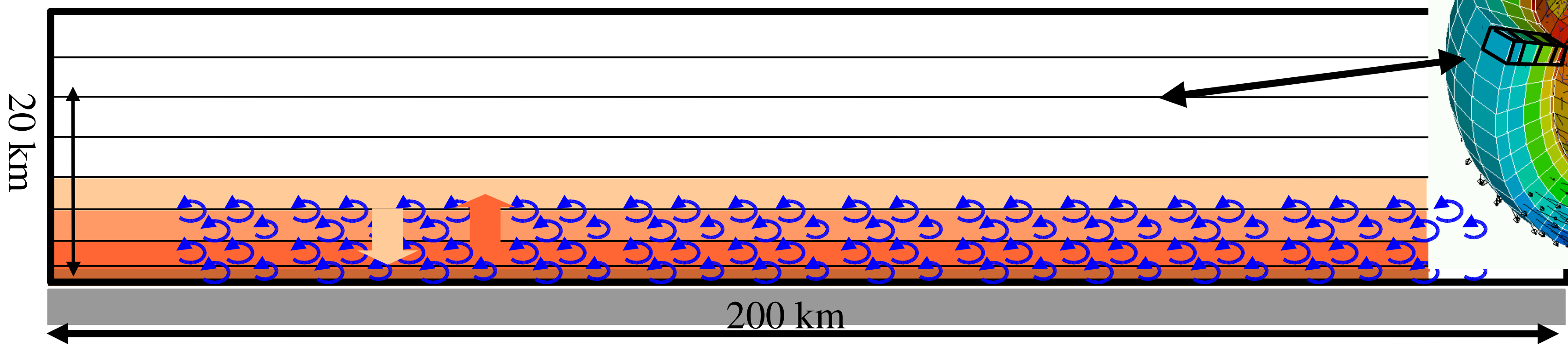
- Importants près de la surface (1-3 km) dans la « couche limite » atmosphérique (turbulence au décollage en avion). Source : frottement sur les obstacles + chauffage surface

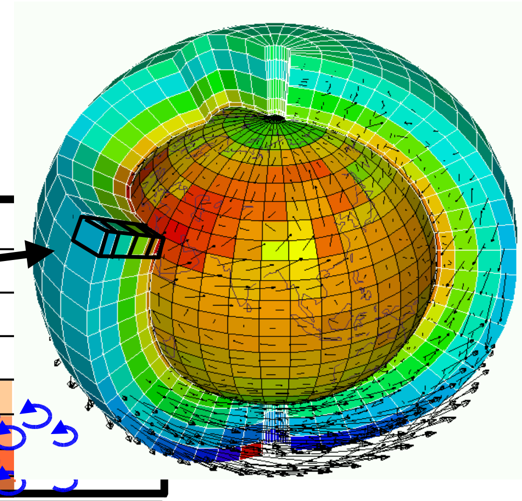
- Responsables du mélange vertical des composants

- Peu de turbulence (atmosphère « stable ») → pollution forte en surface.



Dans une colonne du modèle ...





Paramétrisation de la turbulence

→ **« Mélange turbulent »** ou diffusion turbulente.
Transport par des petits mouvements aléatoires.
Analogue à la diffusion moléculaire.

$$Dq/Dt = Sq \quad \text{avec} \quad Sq = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial q}{\partial z} \right)$$

→ Longueur de mélange de Prandtl : $K_z = l|w|$

l : longueur caractéristique des mouvements

w : vitesse caractéristique

→ Energie cinétique turbulente : $K_z = l\sqrt{e}$

$De/Dt = f\,(dU/dz,\ d\theta/dz, e, \ldots)$

$Dl/dt = \ldots$

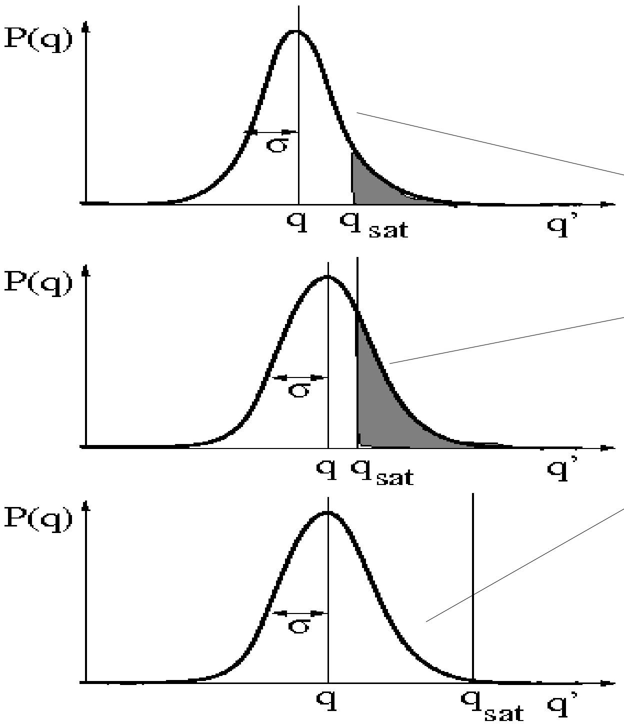
Un monde en soi ...

Les mêmes modèles sont utilisés en sciences de l'ingénieur
Lois de similitudes → Tests à des échelles différentes en laboratoire

Représentation des nuages

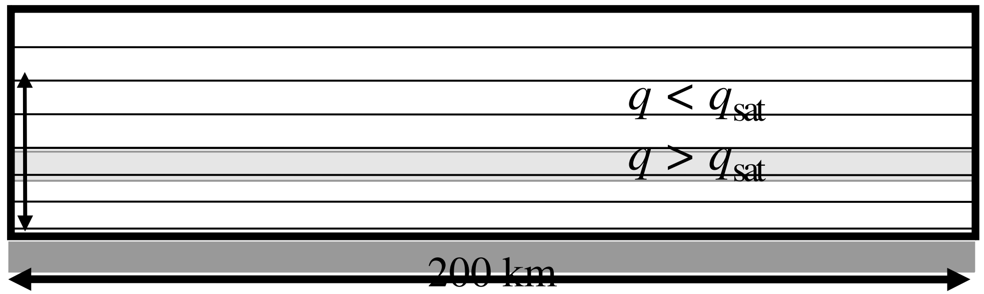
q : concentration en vapeur d'eau
q_{sat} : concentration maximum à saturation
Si $q > q_{sat}$:
→ la vapeur d'eau condense = nuage

On connait q et q_{sat} à l'échelle de la maille
→ Fraction de la maille couverte de nuages ?

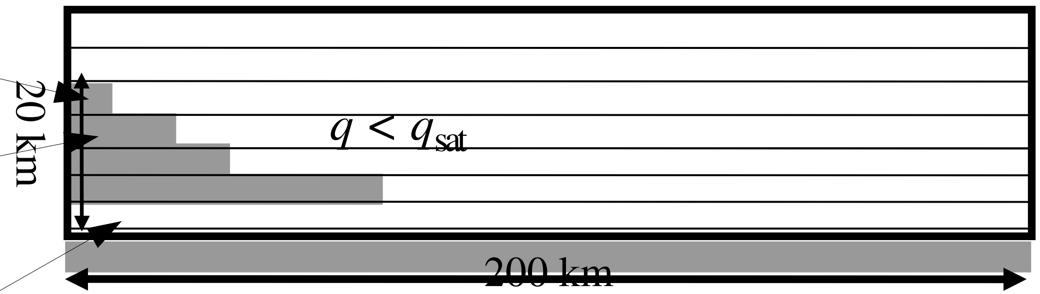


Paramétrisation simple : gaussienne $\sigma / q = 20\%$

Modèle « tout ou rien » :
Si $q > q_{sat}$ maille nuageuse, sinon ciel clair.



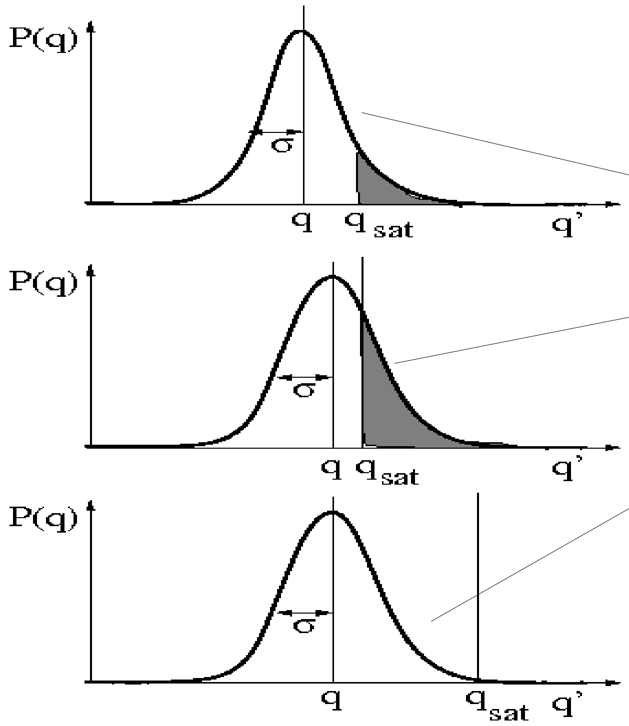
Modèle « statistique » :
On suppose une distribution statistique de q' dans la maille autour de q



Représentation des nuages

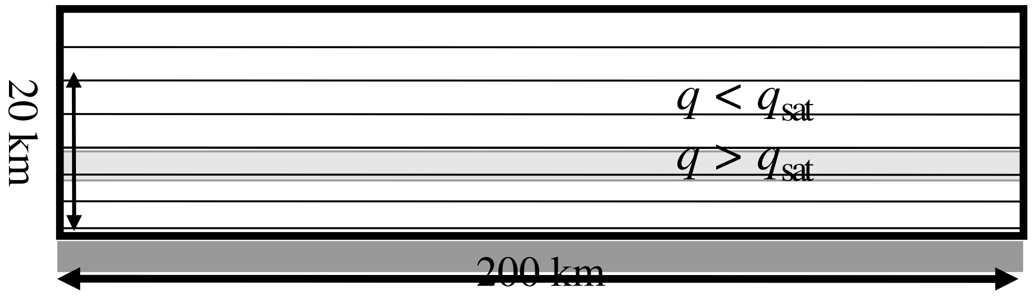
q : concentration en vapeur d'eau
q_{sat} : concentration maximum à saturation
Si $q > q_{sat}$:
→ la vapeur d'eau condense = nuage

On connait q et q_{sat} à l'échelle de la maille
→ Fraction de la maille couverte de nuages ?

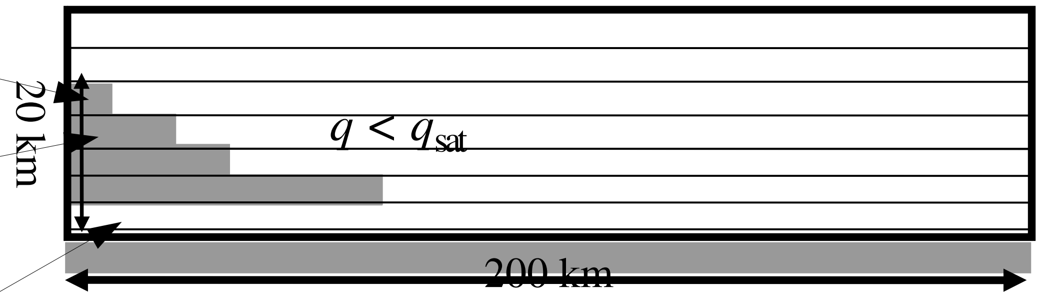


Paramétrisation simple : gaussienne $\sigma / q = 20\%$

Modèle « tout ou rien » :
Si $q > q_{sat}$ maille nuageuse, sinon ciel clair.



Modèle « statistique » :
On suppose une distribution statistique de q' dans la maille autour de q



Intervient dans ***Q***
→ condensation
→ prise en compte des nuages dans le code radiatifs

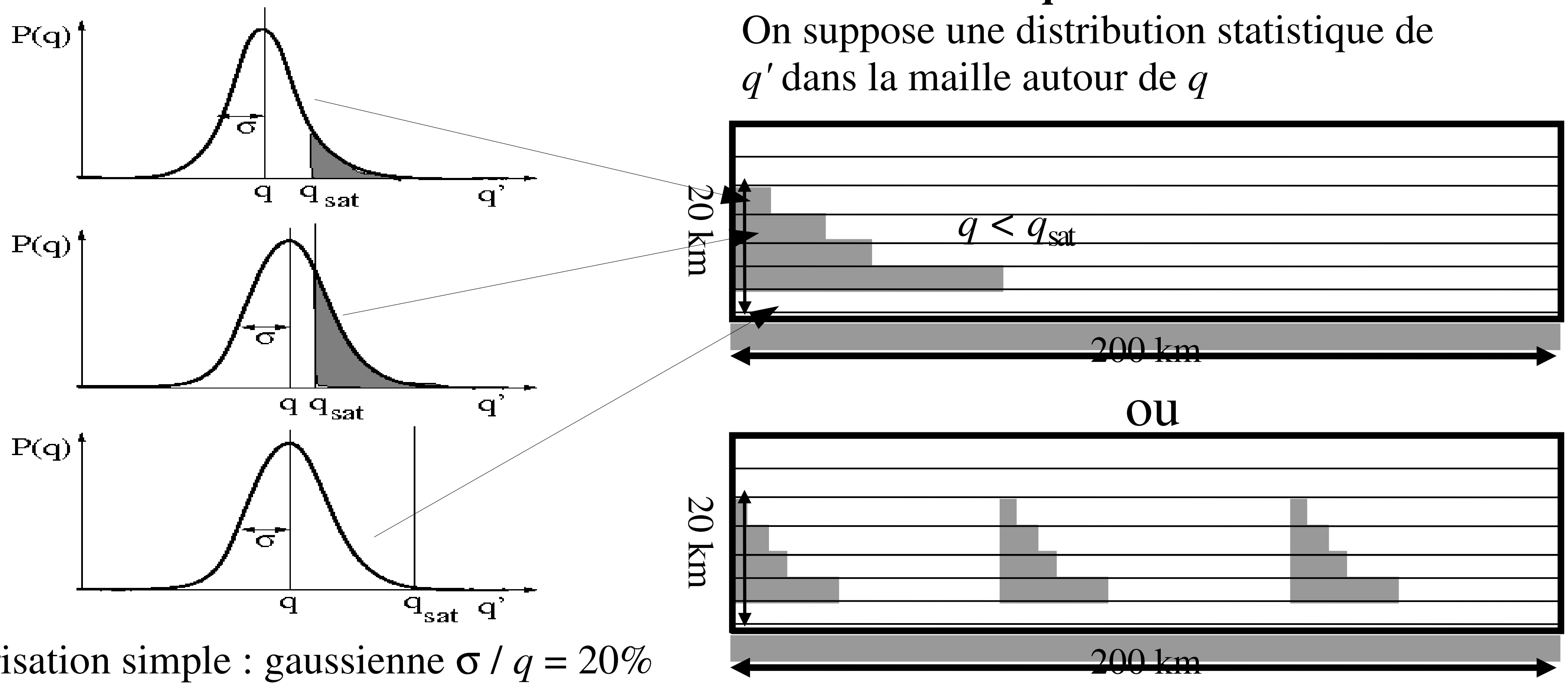
Représentation des nuages

q : concentration en vapeur d'eau
q_{sat} : concentration maximum à saturation
Si $q > q_{sat}$:
→ la vapeur d'eau condense = nuage

On connait q et q_{sat} à l'échelle de la maille
→ Fraction de la maille couverte de nuages ?

Modèle « tout ou rien » :
Si $q > q_{sat}$ maille nuageuse, sinon ciel clair.

Modèle « statistique » :
On suppose une distribution statistique de q' dans la maille autour de q



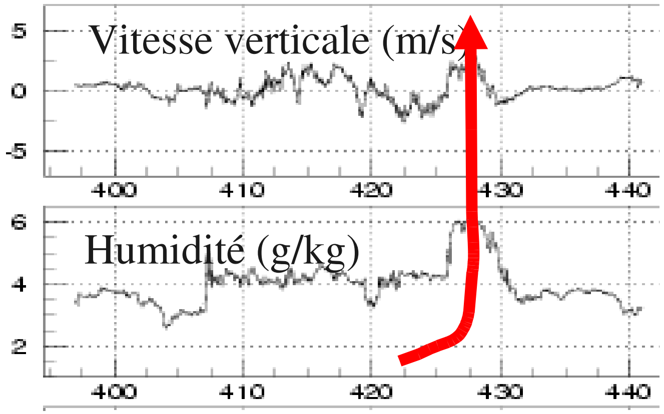
Paramétrisation simple : gaussienne $\sigma / q = 20\%$

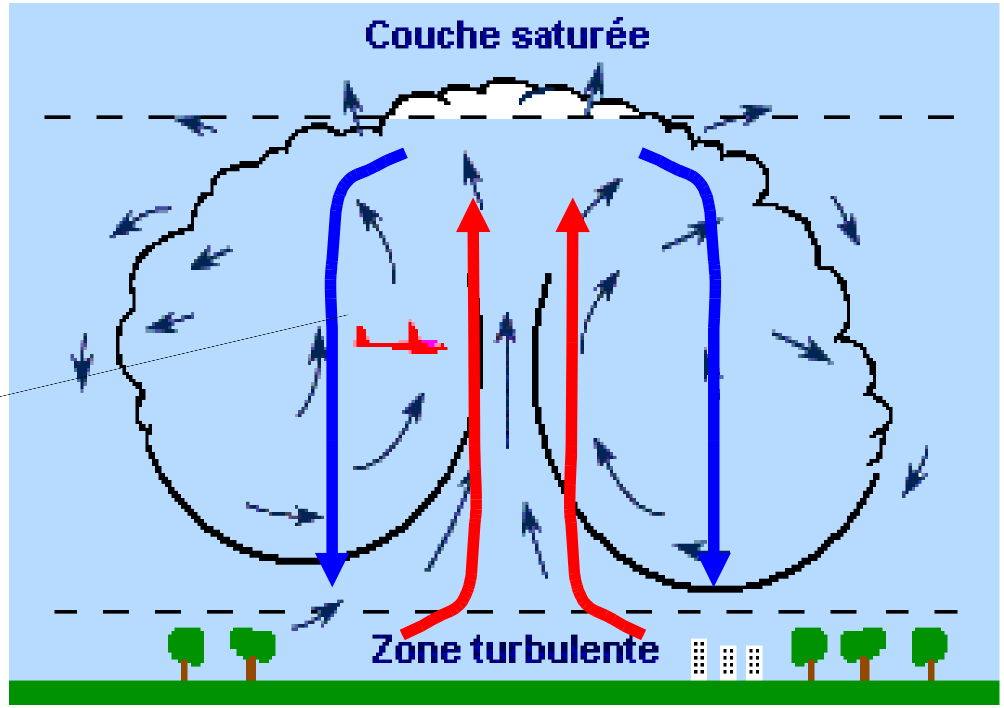
III. Illustration de la méthodologie de développement et d'évaluation sur des développements en cours

Turbulence isotrope de petite échelle → mélange turbulent

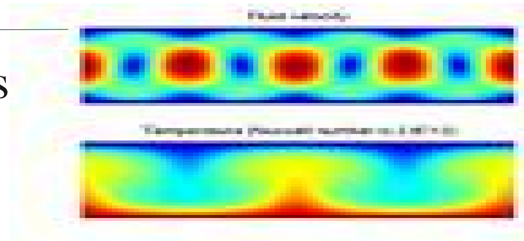
Turbulence atmosphérique :
“méso-échelle”, organisée et anistrope

Exemples de mesures avion en palier
(région parisienne, conditions estivales, cumulus)

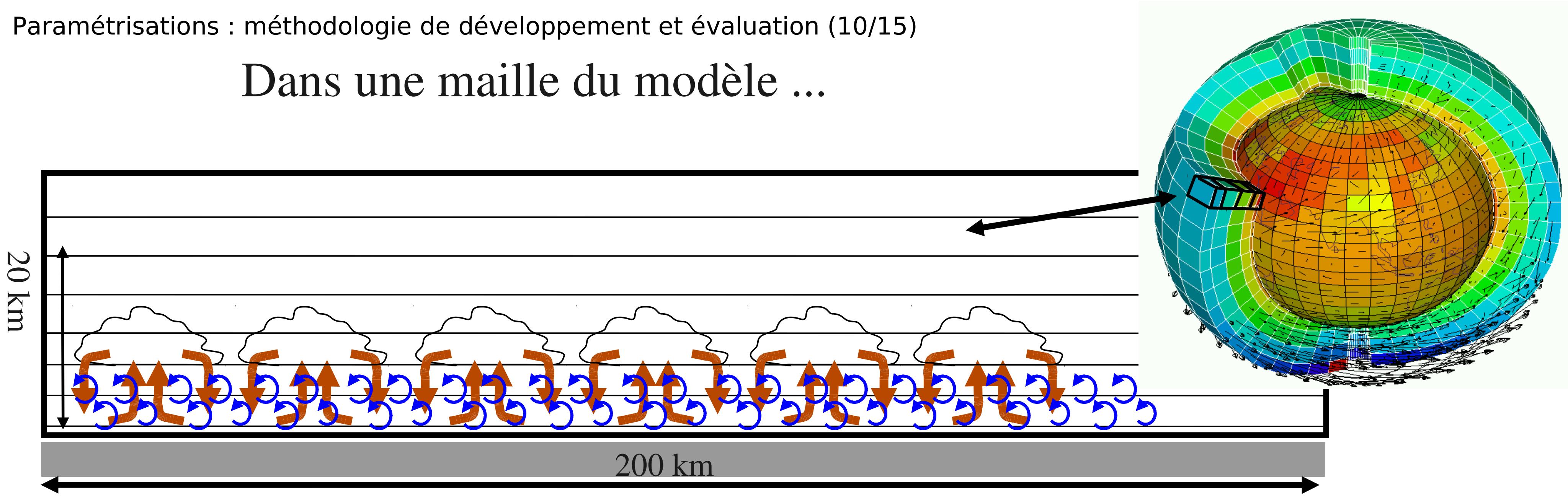


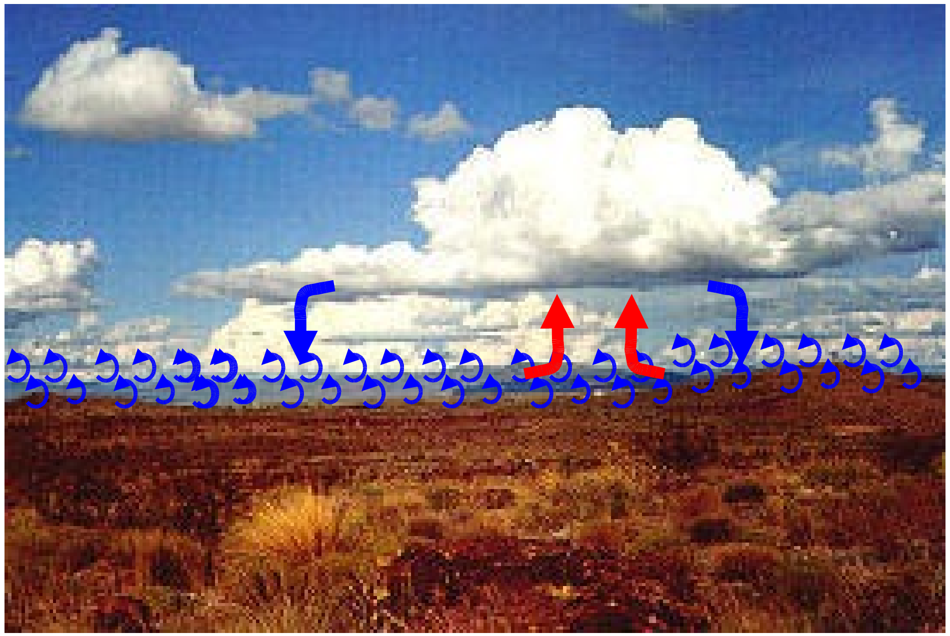


- L'air chaud (léger) et humide monte de la surface sous l'effet des forces d'Archimède.
- Analogue à la convection de Rayleigh-Benard
- En montant cet air se refroidit (détente adiabatique) et ne peut plus contenir autant de vapeur d'eau.
- Si saturation : apparition de cumulus en haut du panache .



Dans une maille du modèle ...

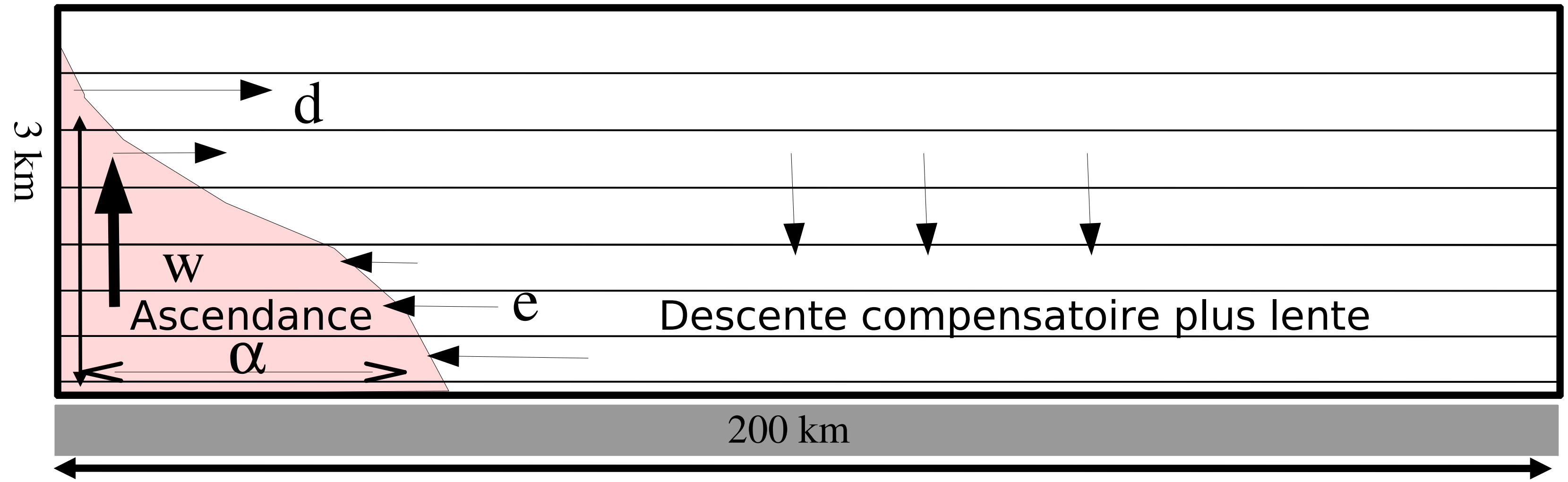




« Modèle du panache thermique »

Chaque colonne atmosphérique est séparée en deux parties :
de l'air qui monte depuis la surface et de l'air qui descend autour.
On représente un panache moyen avec un nuage moyen.

Paramétrisations : méthodologie de développement et évaluation (11/15)



Variables internes de la paramétrisation :

w : vitesse moyenne des panaches ascendants

α : fraction de la surface couverte par les ascendances

e : taux d'entrée latérale d'air dans le panache (entrainement)

d : sorties d'air depuis le panache (détrainement)

q_a : concentration du composant q dans l'ascendance

Terme source pour les équations explicites

$$S_q = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}\rho\overline{w'q'} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}\rho K_z\frac{\partial q}{\partial z} + -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}\left[\rho\alpha w(q_a - q)\right]$$

Diffusion turbulente

Transport par le modèle de panache

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial f}{\partial z} = e - d \qquad \text{avec} \quad f = \alpha\rho w$$

Conservation de la masse du composant q

$$\frac{\partial f q_a}{\partial z} = eq - dq_a$$

Equation du mouvement

$$\frac{\partial f w}{\partial z} = -dw + \alpha\rho B$$

B étant la poussée d'Archimède

$$B = g\frac{\theta_{va} - \theta_v}{\theta_v}$$

$$e = f\max(0, \frac{\beta_1}{1+\beta_1}(a_1\frac{B}{w^2} - b))$$

$$d = f\max(0, -\frac{a_1\beta_1}{1+\beta_1}\frac{B}{w^2} + c(\frac{(q_a - q)/q_a}{w^2})^d)$$

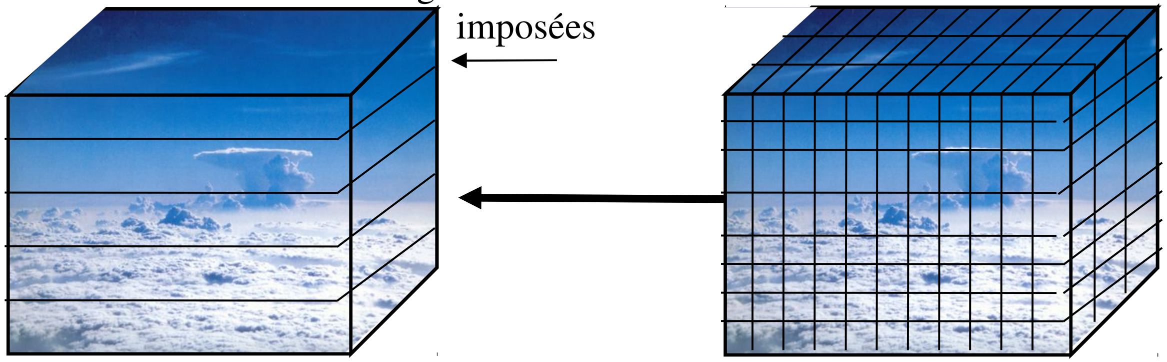
Etc ...

4 Paramètres libres :

$a_1 = \frac{2}{3},\ \beta_1 = 0.9,\ b = 0.002,\ c = 0.012m^{-1},\ d = 0.5$

Conditions
« grande échelle »
imposées

Conditions
« grande échelle »
imposées



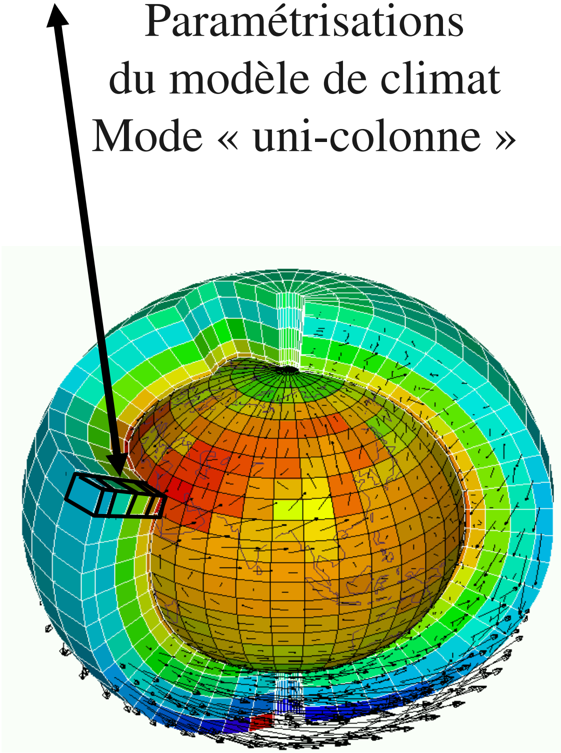
Paramétrisations
du modèle de climat
Mode « uni-colonne »

Simulations 3D
explicites
Maillage 10 – 100 m

Etudes de cas :

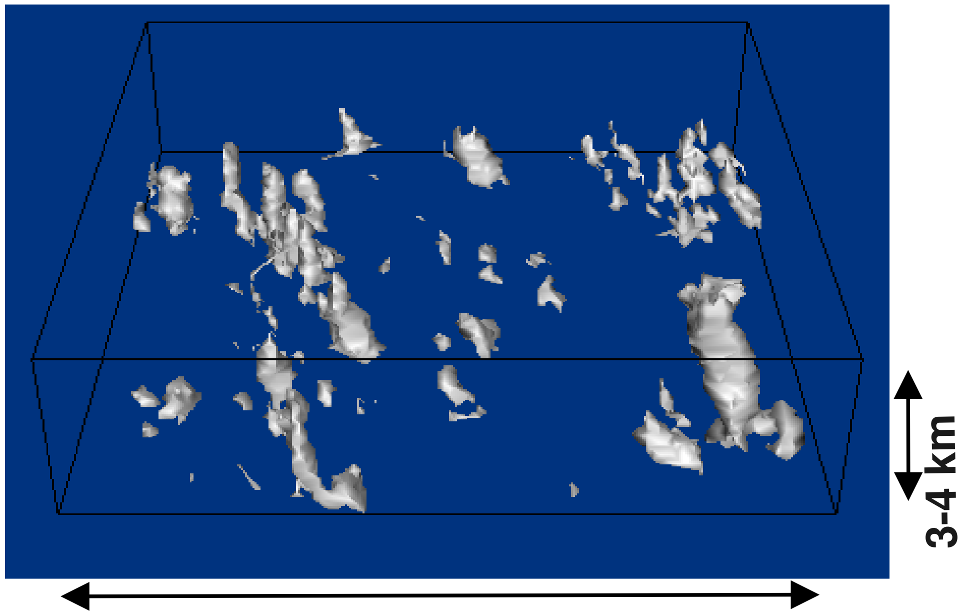
- Cas idéalisés ou académiques
- Cas réels (← observations)

→ choix des paramètres libres
→ évaluation



Cas « Bomex » cumulus marins

Durée:
6 heures
Résolution:
x~ 100m
z ~ 40m
t~ 3 seconds

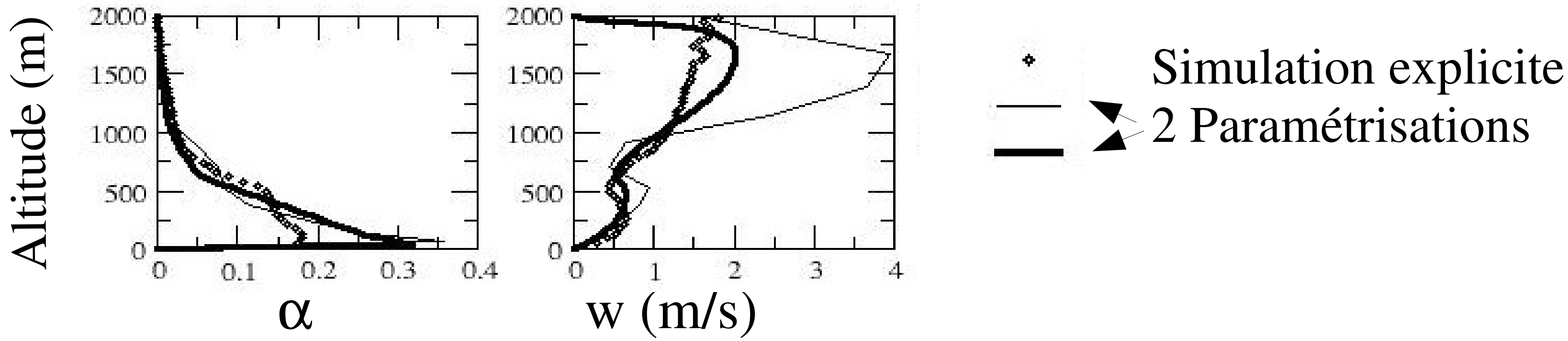


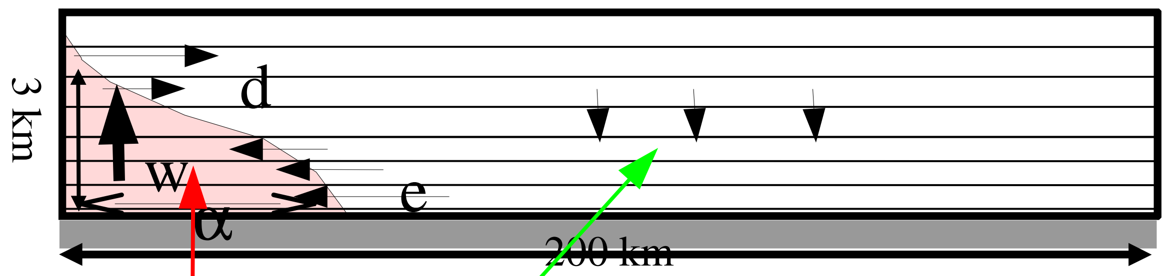
http://www.knmi.nl/~siebesma/gcss/animations/bomex.html

Exemple d'évaluation par rapport à une simulation explicite

→ Cas bomex de petits cumulus marins

→ Estimation des variables internes : fraction couverte α et vitesse verticale w





Paramétrisation de la distribution sous-maille de l'eau

Simulation explicite (barres)

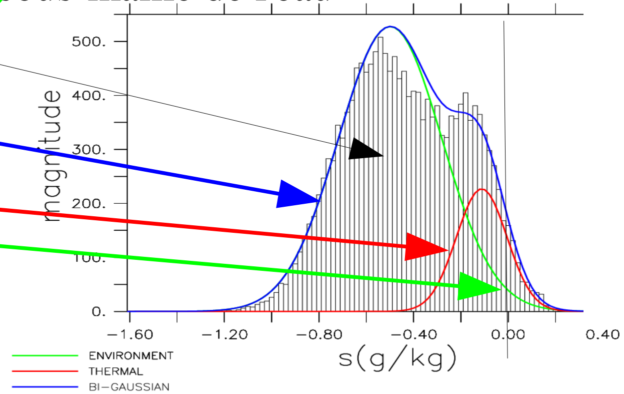
Paramétrisation

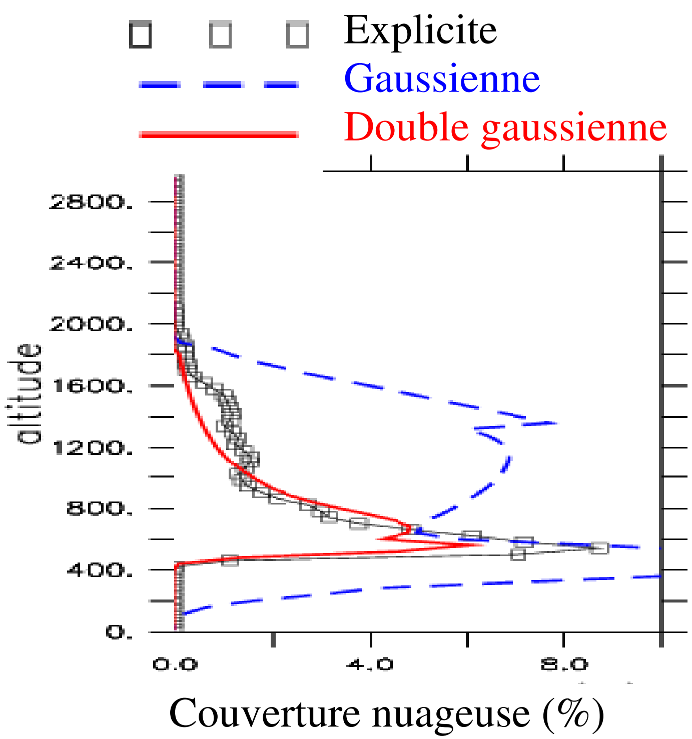
Combinaison de 2 gaussiennes

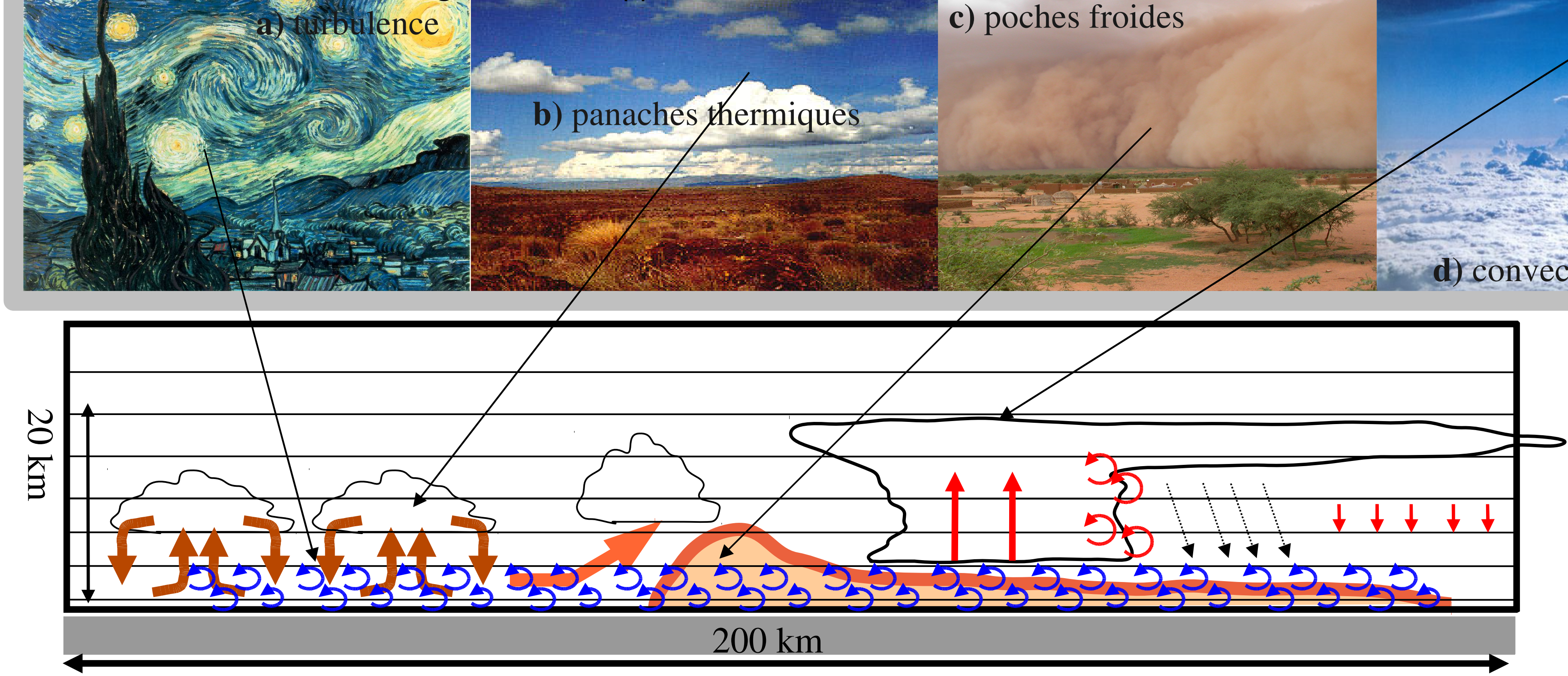
- panache

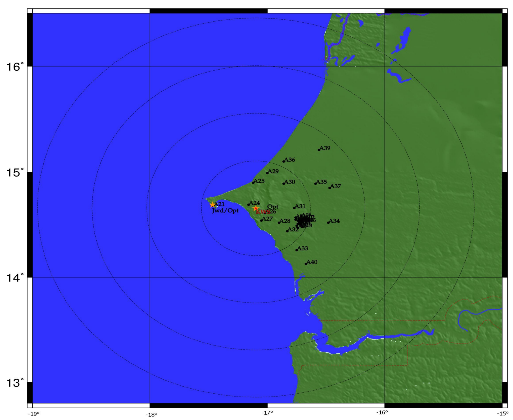
- environnement

Cas bomex. Altitude 1200m



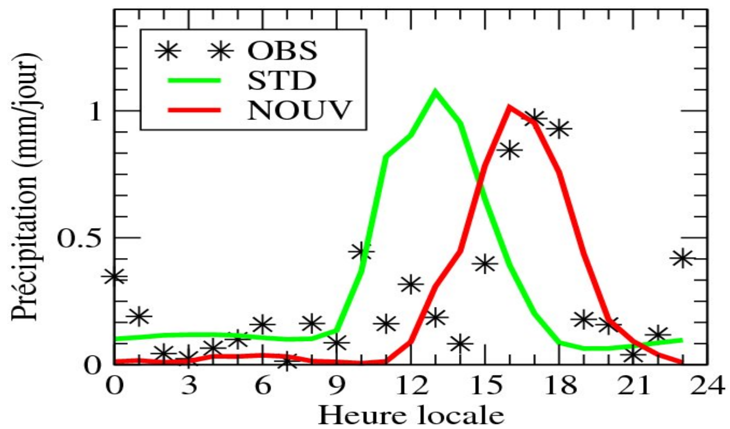






Evolution moyenne
de la pluie dans
la journée
au Sénégal dans une
Simulation 3D

Réseau d'observation au
Sénégal. Campagne AMMA.



Résumé

Paramétrisations des processus sous-maille :

Basées sur la physique (essentiel dans le cadre du changement climatique)
Approchées (mais on a depuis 20 ans des nuages dans les modèles)
De plus en plus complexes et réalistes (confrontation permanente aux observations)
Egalement une façon de découper le problème pour comprendre : climat / processus

Enjeux :

Réalisme des modèles de climat (et de prévision du temps)
Sensibilité aux forçages externes (rôle prépondérant des nuages dans la dispersion des projections)
Variables « sensibles » pour le climat local : pluie, rayonnement, ...

Méthodologie :

1. Compréhension des processus

→ Théorie, modélisation numérique explicite de cas idéalisés
→ Observations ciblées : campagnes dédiées, satellites, ...

2. Dérivation de la paramétrisation

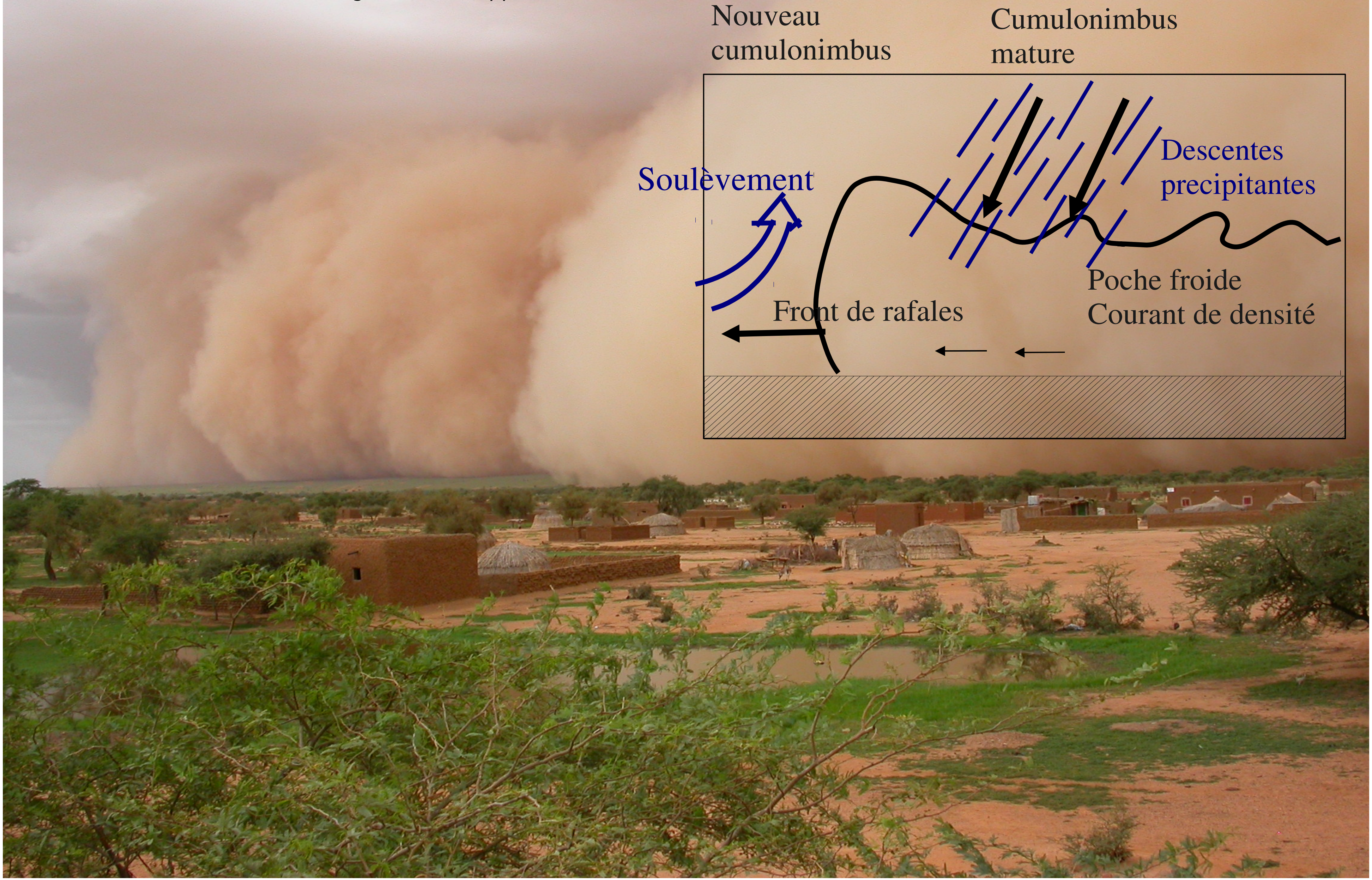
→ Dérivation d'équations approchées. Passage au monde numérique.
→ Ajustement de paramètres libres par rapport aux résultats de ces simulations explicites

3. Evaluation :

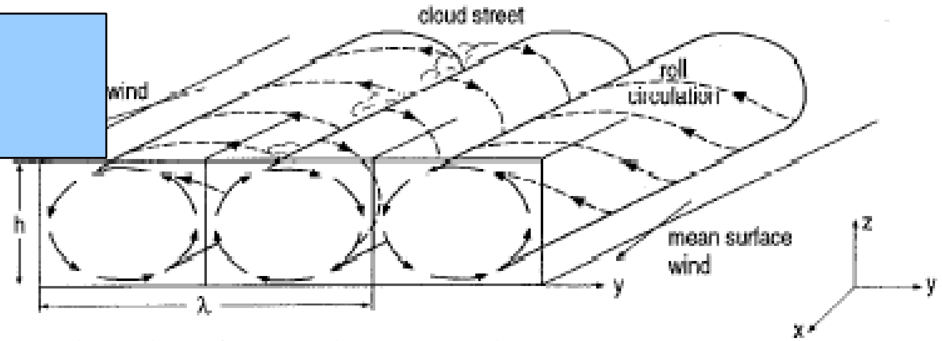
→ Sur les cas d'étude avec une version uni-colonne du modèle
→ Dans le modèle 3D complet (en mode prévision du temps, ou statistiquement)

Remarques :

→ « Science hybride » : physique (mécanique des fluides, transfert radiatif, thermodynamique), mathématiques, informatique. Pas toujours bien fondée. Difficile à expliquer. Passionnante.
→ Développements des paramétrisations : investissement sur le long terme (en dizaines d'années). Mal adapté aux modes de fonctionnement et programmation de la recherche moderne.

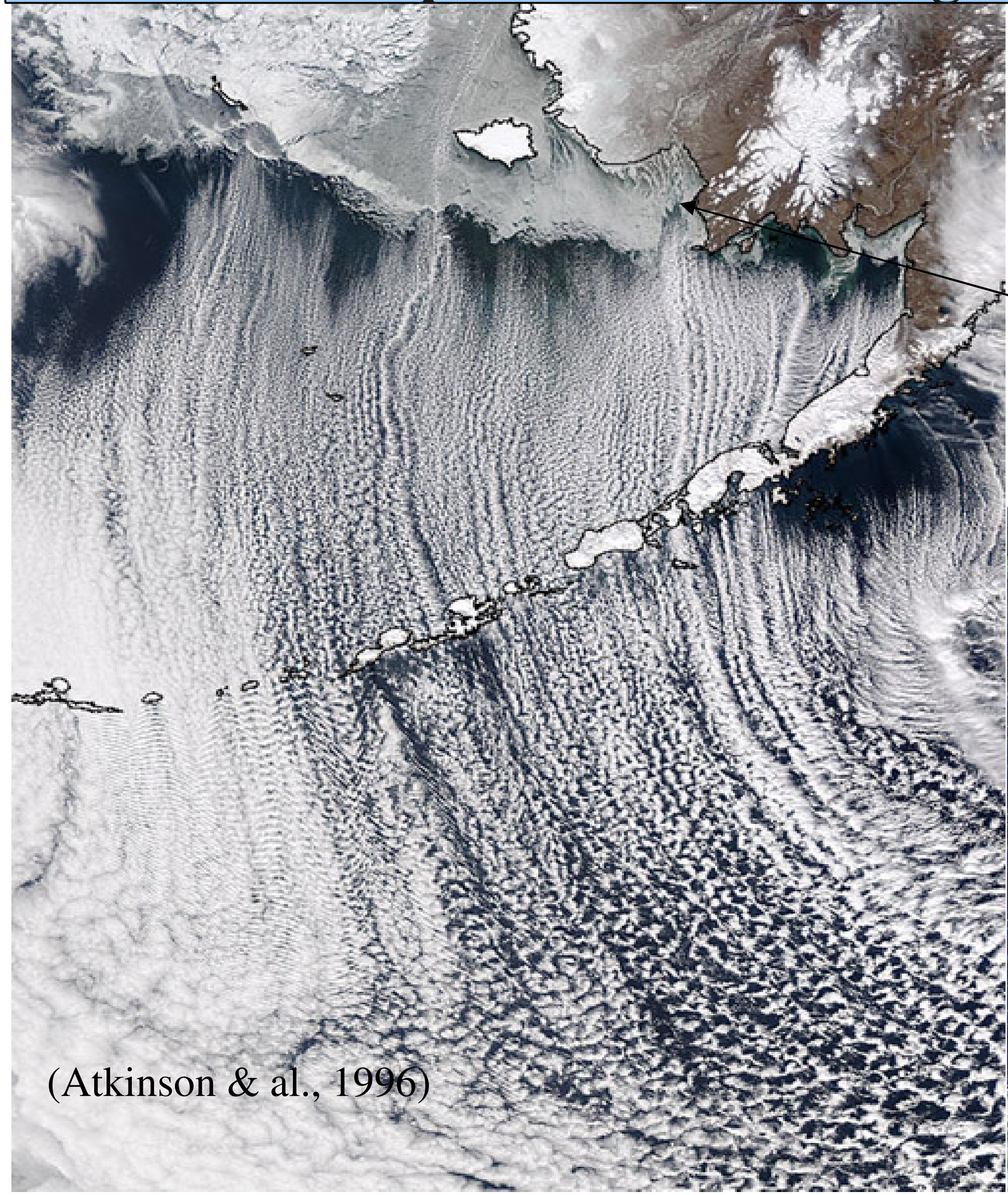

Nouveau
cumulonimbus
Cumulonimbus
mature
Descentes
precipitantes
Soulèvement
Front de rafales
Poche froide
Courant de densité

Importance des structures organisées visualisées ici par les rues de nuages



Exemple classique de rues de nuages créées au sommets de rouleaux convectifs :

- arrivé d'air polaire froid sur des masses océaniques plus chaudes
- entrée d'air marin doux sur un continent plus chaud



(Atkinson & al., 1996)