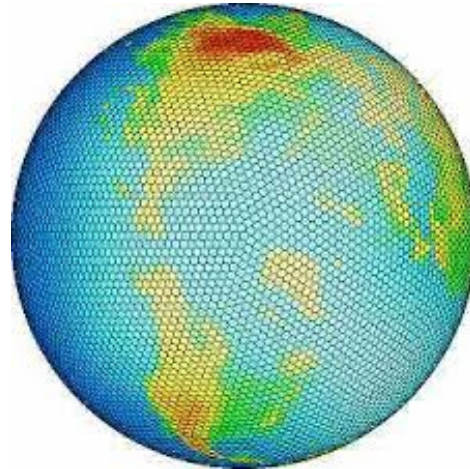
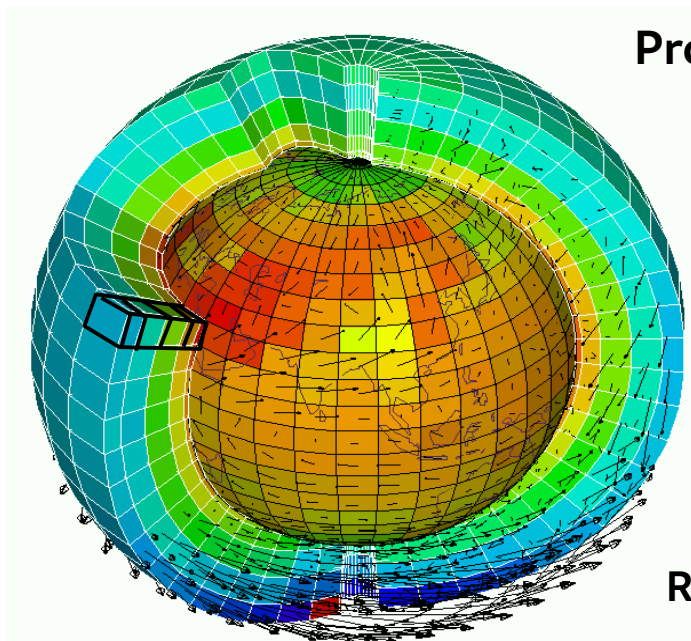


Les paramétrisations physiques dans les modèles de circulation générale de l'atmosphère



Étienne Vignon et toute l'équipe LMDZ



Processus PHYSIQUES non résolus par la DYNAMIQUE

- Mass conservation
 $D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$
- Potential temperature conservation
 $D\theta / Dt = Q / C_p (p_0/p)^\kappa$
- Momentum conservation
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$
- Secondary components conservation
 $Dq/Dt = S_q$

Rôle des PARAMÉTRISATIONS SOUS-MAILLE :

Termes source/puit dans les équations

- Q : chauffage par condensation, évaporation, turbulence sous-maille
- \underline{F} : freinage/accélération par mouvements turbulents sous-maille
- S_q : condensation/sublimation, réactions chimiques, microphysique nuageuse, turbulence

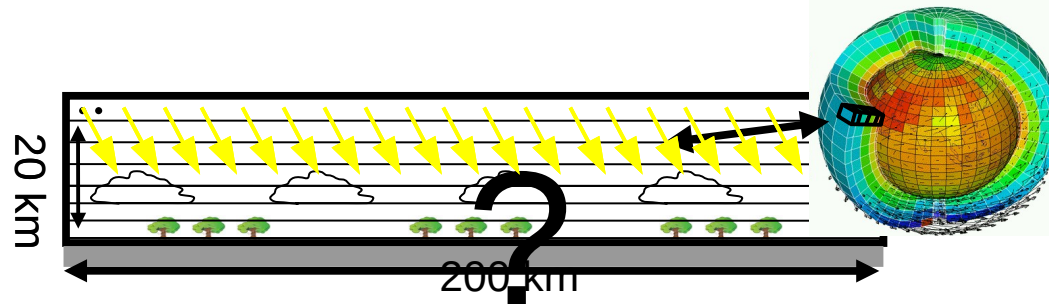
X = vecteur des variables d'états (T, u, v, q)

$$\partial_t X = D(X) + \Sigma P(X, \lambda)$$

- P traduit l'effet moyen d'un **processus sous-maille non résolu** sur les variables d'état du modèle
- P est basé sur une description du comportement **moyen** des processus (ex: population de nuages)
- Hypothèse d'**homogénéité statistique sur l'horizontale** (comme l'hypothèse plan parallèle pour le rayonnement)
- Une paramétrisation implique le traitement de variables additionnelles internes à la "physique" mais aussi l'introduction de **paramètres libres** qui doivent être calibrés ("**tuning**")
- La "sortie" d'une paramétrisation est une tendance du vecteur des variables du modèles:

$$\partial_t X|_{\text{process}}$$

- **La physique est 1D sur l'axe vertical** (échanges verticaux uniquement)
→ les **colonnes sont donc indépendantes** (intérêts informatiques mais surtout grille de lecture de l'atmosphère)



Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif
- Ondes de gravité non-orographiques ...

Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif
- Ondes de gravité non-orographiques ...

Principe

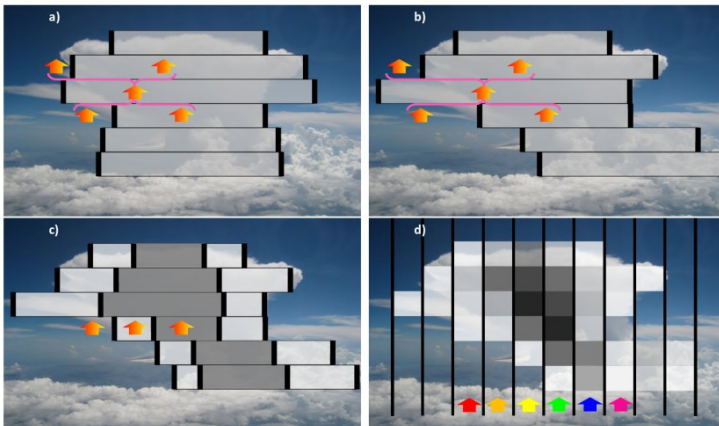
$$\frac{dF^\downarrow}{dz} = k \left(-\gamma_1 F^\downarrow + \gamma_2 F^\uparrow + S^\downarrow \right)$$

$$-\frac{dF^\uparrow}{dz} = k \left(-\gamma_1 F^\uparrow + \gamma_2 F^\downarrow + S^\uparrow \right)$$

Effet aérosols, nuages
(optique + distribution + recouvrement)

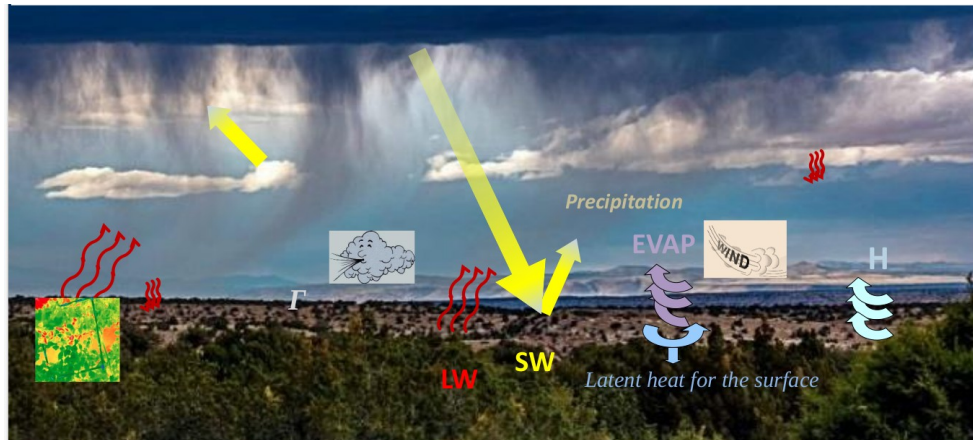
Variables affectées :

T



Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif
- Ondes de gravité non-orographiques ...



Principe

Calcul des flux d'énergie, d'eau et de quantité de mouvement à la surface selon la théorie de Monin-Obukhov

$$\tau = \rho_1 U_*^2 = \rho C_d U_1^2$$

$$H = -\rho_1 c_p C_h U_1 (\theta_{v1} - \theta_s)$$

$$L_e = -\rho_1 L_{\text{sub}} C_h U_1 (q_{v1} - q_{vs})$$

Cheruy et al.

Variables affectées :

T, u, v, q

Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif
- Ondes de gravité non-orographiques ...

Reynolds decomposition

\tilde{X} : "average" or "large scale" variable
 $\bar{X} = \tilde{\rho} \tilde{\mathbf{v}} / \tilde{\rho}$: air mass weighted "average"
 $X = \tilde{X} + X'$: X' , turbulent fluctuation

$$\begin{aligned} \Rightarrow \rho \tilde{\mathbf{v}} c &= \rho (\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}') (\bar{c} + c') \\ &= \tilde{\rho} \bar{\mathbf{v}} \bar{c} + \tilde{\rho} \overline{\mathbf{v}' c'} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} c) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \tilde{\rho} \bar{c}}{\partial t} + \text{div}(\tilde{\rho} \bar{\mathbf{v}} \bar{c}) + \text{div}(\tilde{\rho} \overline{\mathbf{v}' c'}) = 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{grad} c = -\frac{1}{\rho} \text{div}(\rho \overline{\mathbf{v}' c'}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho \mathbf{v}' c'}}{\partial z}$$

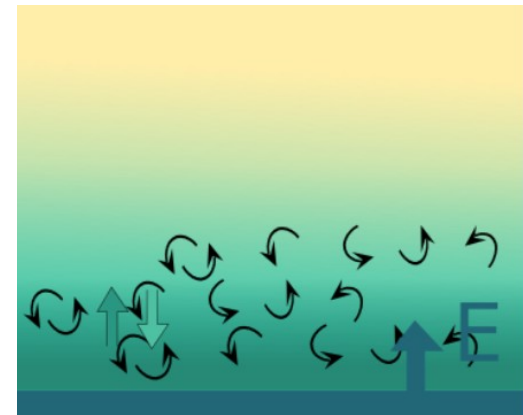
Principe

Pour tous les mouvements sous-maille,
décomposition de Reynolds
Induite par le découpage structural entre échelles résolues et non résolues

Pour la turbulence locale, expression du flux en **contre-gradient**

$$\overline{w' c'} = -K_z \frac{\partial c}{\partial z}$$

$$K_z \sim l TKE^{0.5}$$



Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif
- Ondes de gravité non-orographiques ...

Reynolds decomposition

$$\begin{array}{l} \tilde{X}: \text{"average" or "large scale" variable} \\ \bar{X} = \tilde{\rho} \tilde{\mathbf{v}} / \tilde{\rho}: \text{air mass weighted "average"} \\ X = \tilde{X} + X': X', \text{ turbulent fluctuation} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \Rightarrow \tilde{\rho} \tilde{\mathbf{v}} c = \rho (\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}') (\bar{c} + c') \\ = \tilde{\rho} \bar{\mathbf{v}} \bar{c} + \tilde{\rho} \overline{\mathbf{v}' c'} \end{array} \right.$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho} c}{\partial t} + \text{div}(\tilde{\rho} \tilde{\mathbf{v}} c) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \tilde{\rho} \bar{c}}{\partial t} + \text{div}(\tilde{\rho} \bar{\mathbf{v}} \bar{c}) + \text{div}(\tilde{\rho} \overline{\mathbf{v}' c'}) = 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{grad} c = -\frac{1}{\rho} \text{div}(\rho \overline{\mathbf{v}' c'}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho \mathbf{v}' c'}}{\partial z}$$

Principe

Pour tous les mouvements sous-maille,
décomposition de Reynolds
Induite par le découpage structural entre échelles résolues et non résolues

Pour la turbulence locale, expression du flux en **contre-gradient**

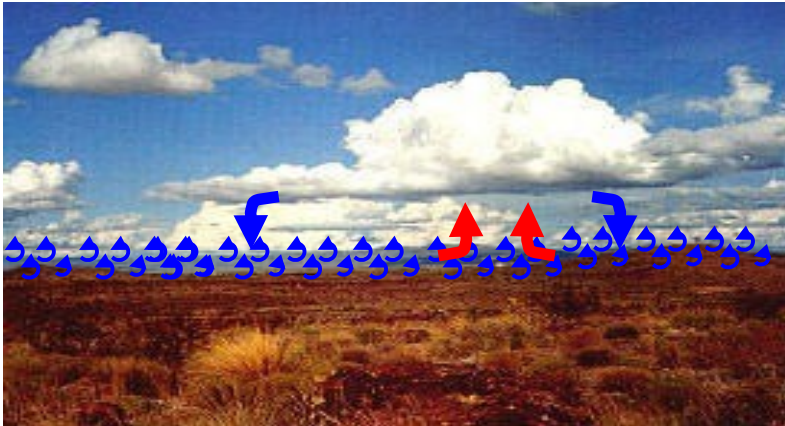
$$\overline{w' c'} = -K_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad K_z \sim l TKE^{0.5}$$

Variables affectées :

T, u, v, q

Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

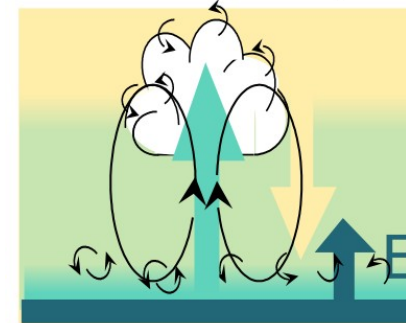
- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif



Principe

le panache « moyen » pour le mélange non-local

Panache thermiques nuageux



Variables affectées :

T, u, v, q

Hourdin et al.
Rio et al.

Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif
- Ondes de gravité non-orographiques ...

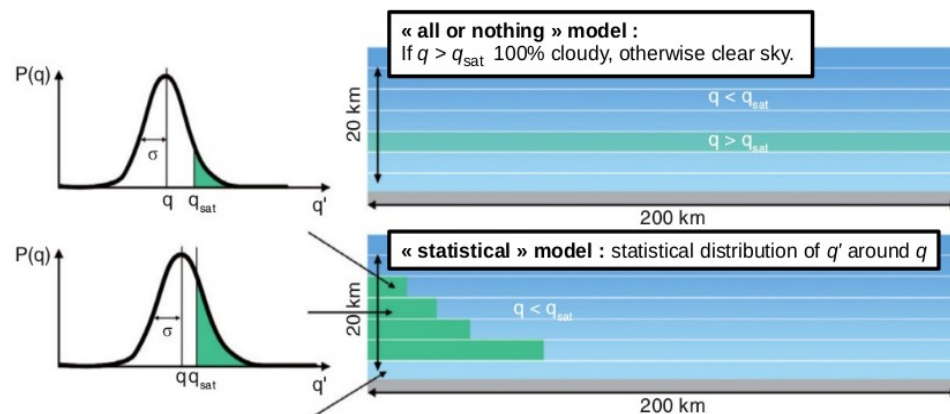


Picture by Oleg Artyemeyev taken from the ISS

2

Principe

Statistical cloud scheme



Variables affectées :

Madeleine et al.

T, q

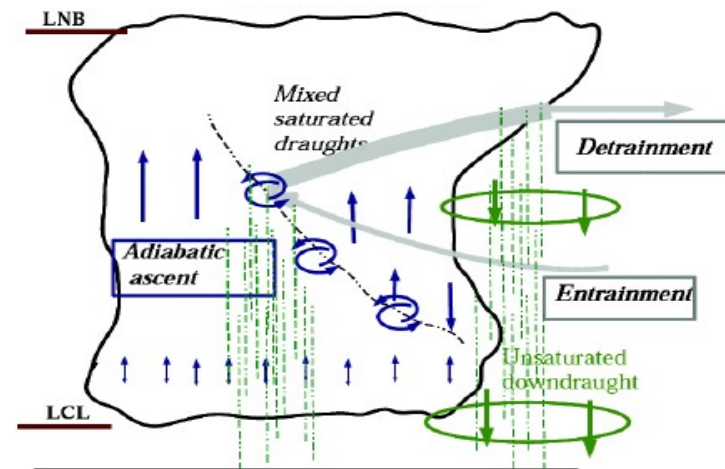
Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif
- Ondes de gravité non-orographiques ...



Principe

Déclenchement sous instabilité conditionnelle



Grandpeix et al.

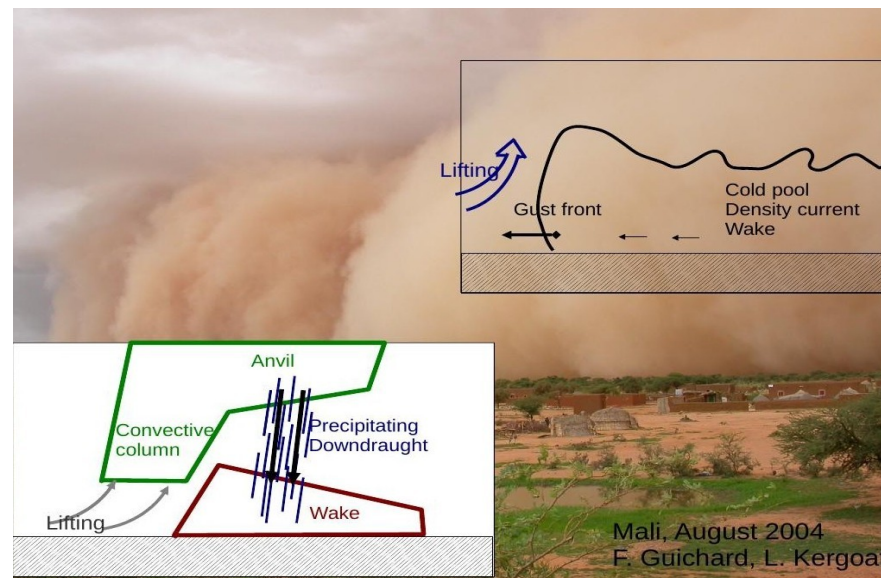
Variables affectées :

 T, u, v, q

Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif
- Ondes de gravité non-orographiques ...

Principe



Variables affectées :

Grandpeix et al.

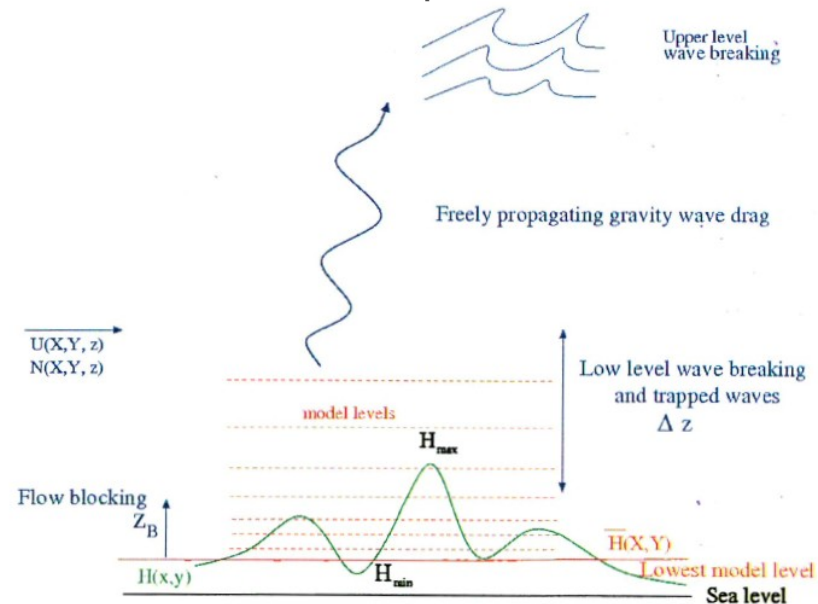
T, u, v, q

Liste des paramétrisations du modèle LMDZ

- Couplage avec la surface (flux en surface)
- Diffusion turbulente
- Convection peu profonde
- Convection profonde
- Poches froides
- Trainée et couple de l'orographie sous-maille
- Nuages et précipitations « grande-échelle »
- Transfert radiatif
- Ondes de gravité non-orographiques ...



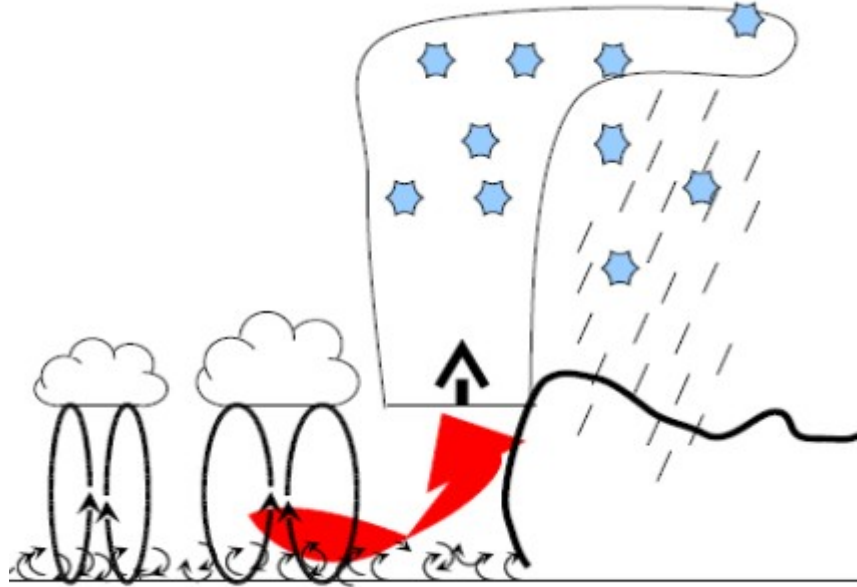
Principe



Variables affectées :

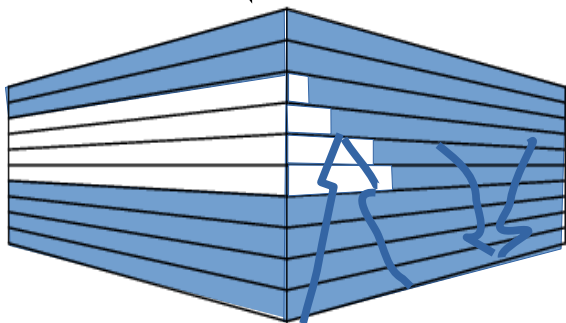
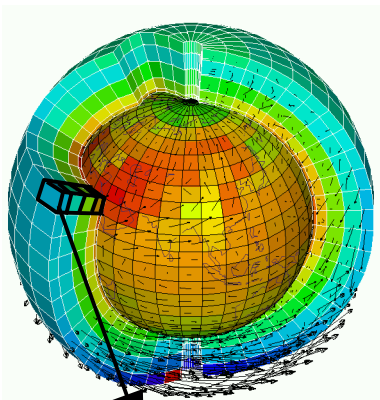
Lott et al.

u, v

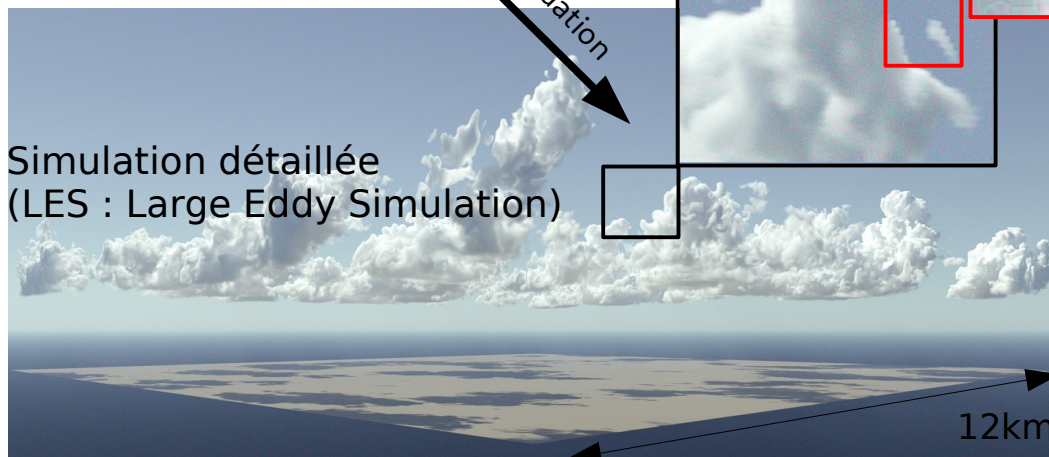


Remarques :

- Interactions et dépendances entre paramétrisations
- Dépendance à la résolution (ou « scale-awareness »)



Campagne d'observation

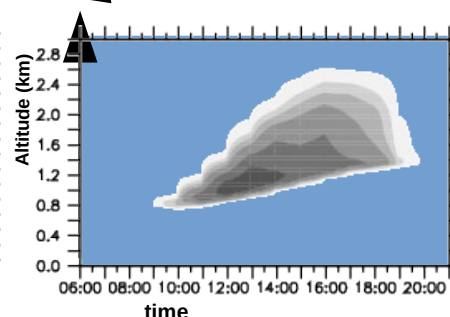
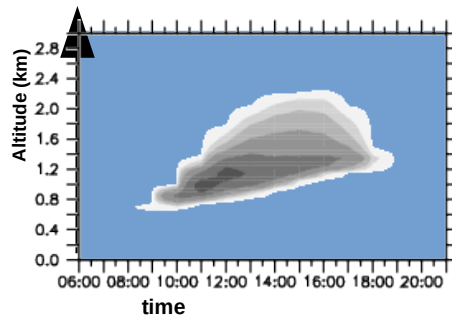


Simulation détaillée
(LES : Large Eddy Simulation)

Evaluation

maille de 8m

12km



Comparaison des fractions nuageuses modèle 1D et LES

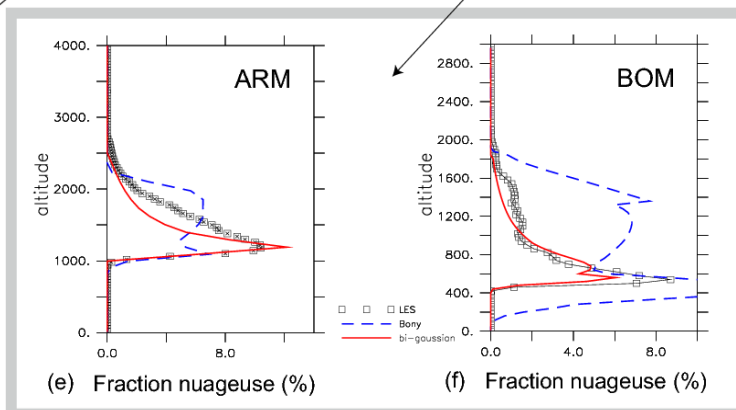
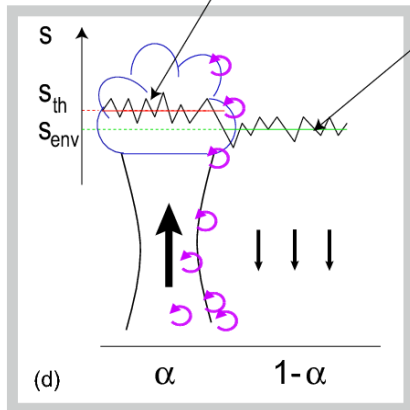
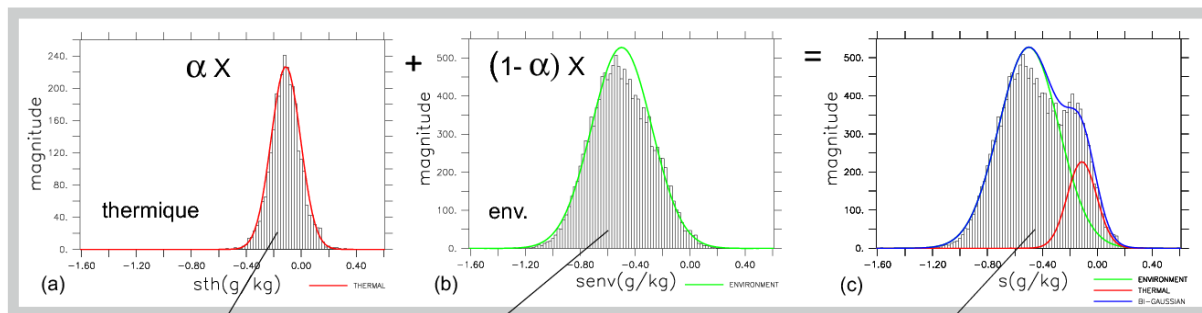
NB : modèle 1D et LES ont les même forçages !

Nouvelle paramétrisation de nuages couplée aux thermiques :

Utilisation d'une PDF bi-gaussienne pour la distribution d'eau totale sous nuageuse

Une gaussienne pour les panaches thermiques et une pour l'environnement

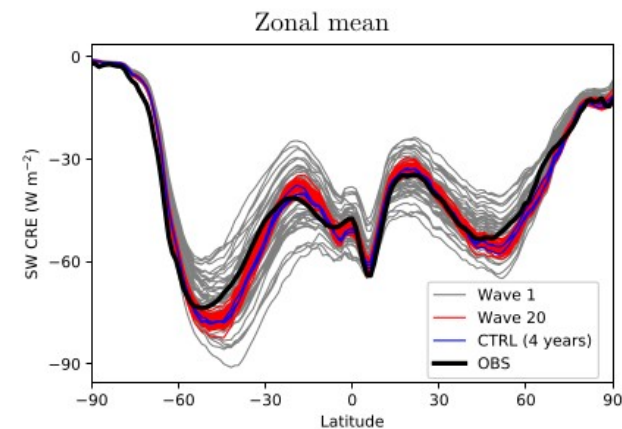
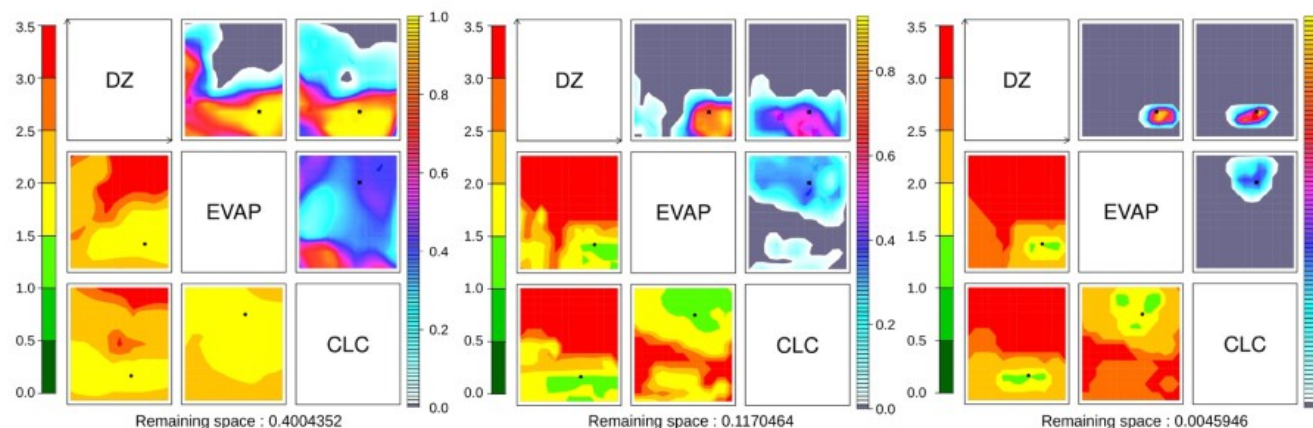
Comparaison des distributions prédites par ce schéma avec les distributions des LES



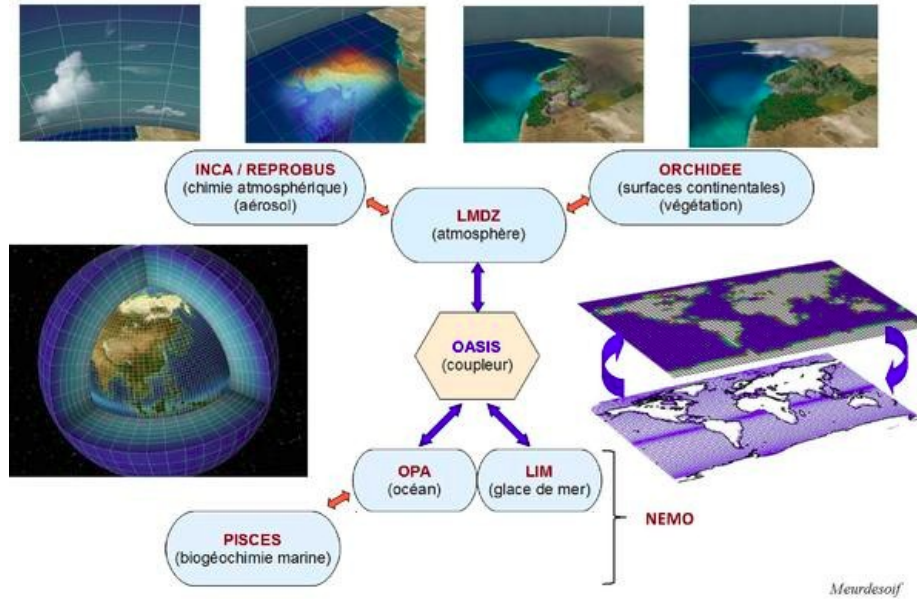
- $1\text{W}/\text{m}^2$ d'erreur du bilan radiatif en sommet de l'atmosphère implique un biais de 1K en température de surface
- $1\text{W}/\text{m}^2$ c'est bien en dessous des incertitudes de mesure
La température globale d'un modèle de climat est donc **NÉCESSAIREMENT** le résultat d'une calibration ! (Hourdin et al. 2017, 'The art and science of climate model tuning')

$$\partial_t \mathbf{X} = \mathbf{D}(\mathbf{X}) + \Sigma \mathbf{P}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\lambda})$$

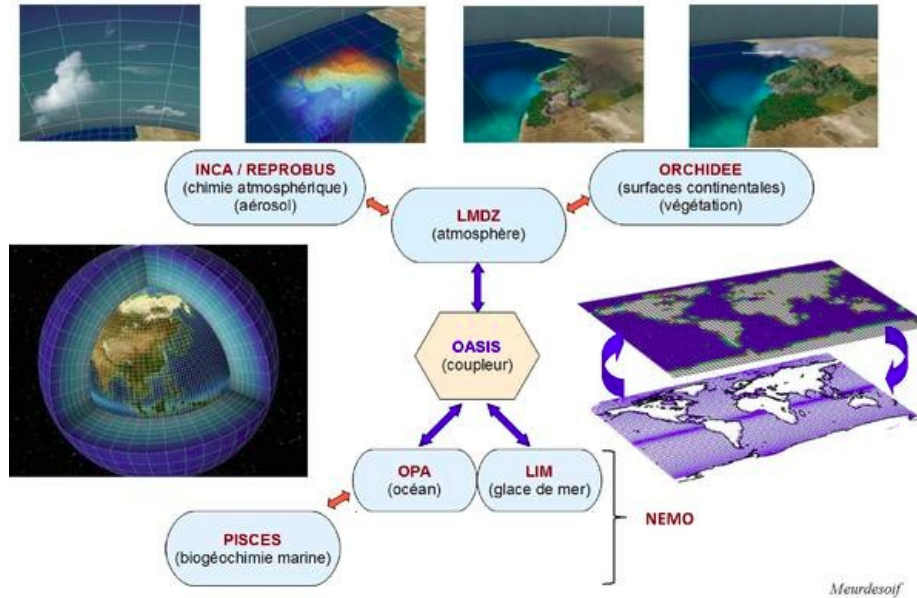
- Méthodologies de **tuning automatique** sur le principe « History Matching » (projet High Tune) sur **cas 1D** (avec ref LES) et **3D** (ref OBS) → **révolution** en modélisation
principe : on « ronge » progressivement l'espace des valeurs « non-acceptables »



Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL



Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL



« The prediction of climate change without [an] accompanying understanding of it is no better than [the] prediction of [a] fortune teller. »

Syukuro Manabe, prix Nobel de physique 2022