

# Développer les paramétrisations physiques atmosphériques: exemple de la représentation des couches limites

F Couvreur ([fleur.couvreur@meteo.fr](mailto:fleur.couvreur@meteo.fr))

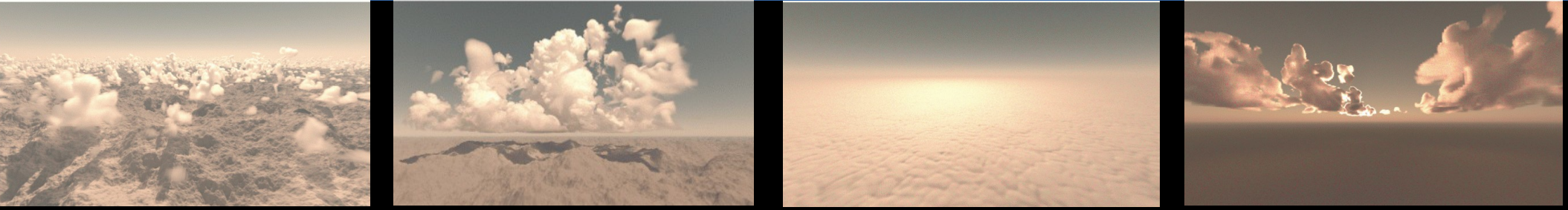
Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse

projet ANR High-Tune et GDR DEPHY





1. Les paramétrisations physiques : définition, rôle
2. Utilisation de simulations haute résolution pour guider leur développement
3. Développement d'un outil de calibration orientée processus
4. Conclusion



1. Les paramétrisations physiques : origine, rôle
2. Utilisation de simulations haute résolution pour guider leur développement
3. Développement d'un outil de calibration orientée processus
4. Conclusion

# Un modèle atmosphérique

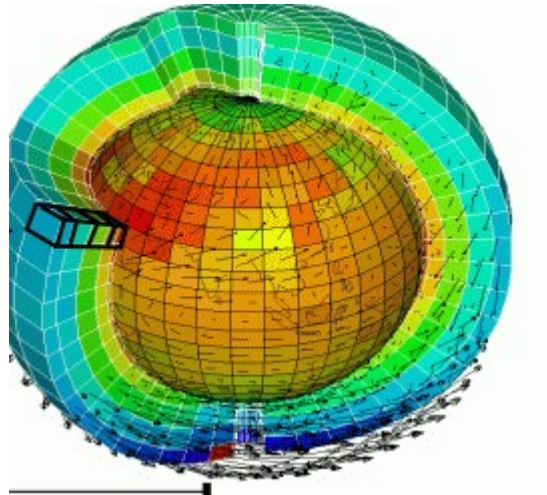
## Prévision Numérique du Temps ou Projection Climatique

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = \mathcal{D}(\mathbf{x}) + \sum_p \mathcal{P}_p(\mathbf{x}, \lambda_p)$$

Coeur  
Dynamique

paramétrisations

$\mathcal{P}_p$  : reflète notre compréhension des processus



### Paramétrisations :

Ce qui n'est pas explicitement résolu : dynamique sous-maille ou associé à une autre physique (ex : rayonnement, microphysique)

Equations de la physique + lois empiriques

Ex : turbulence, condensation sous-maille, précipitation, rayonnement, convection sèche, peu profonde et profonde...

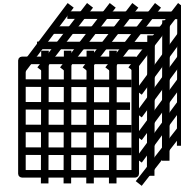
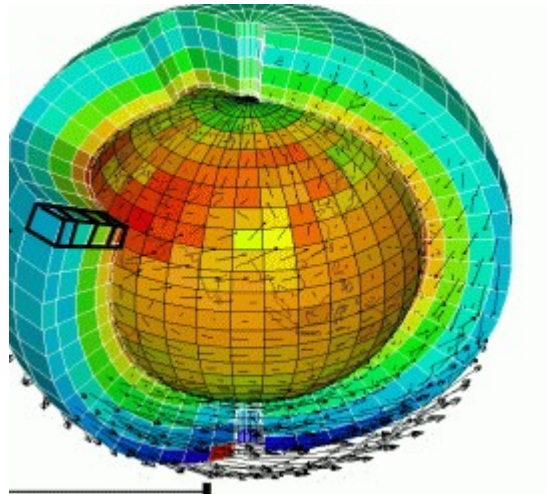
# Un modèle atmosphérique

Prévision Numérique du Temps ou Projection Climatique

Coeur Dynamique paramétrisations

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = \mathcal{D}(\mathbf{x}) + \sum_p \mathcal{P}_p(\mathbf{x}, \lambda_p)$$

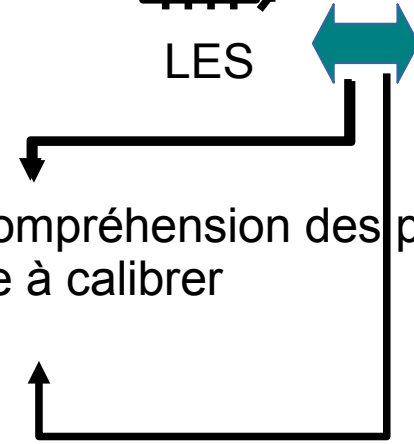
$\mathcal{P}_p$  : reflète notre compréhension des processus  
 $\lambda_p$  = paramètre libre à calibrer



LES



SCM



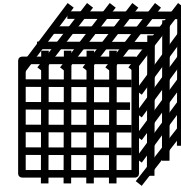
# Un modèle atmosphérique

Prévision Numérique du Temps ou Projection Climatique

Coeur Dynamique paramétrisations

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = \mathcal{D}(\mathbf{x}) + \sum_p \mathcal{P}_p(\mathbf{x}, \lambda_p)$$

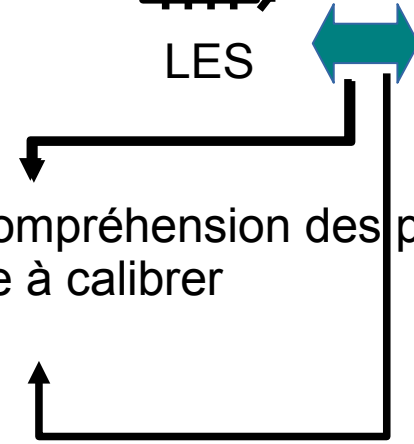
$\mathcal{P}_p$  : reflète notre compréhension des processus  
 $\lambda_p$  = paramètre libre à calibrer



LES

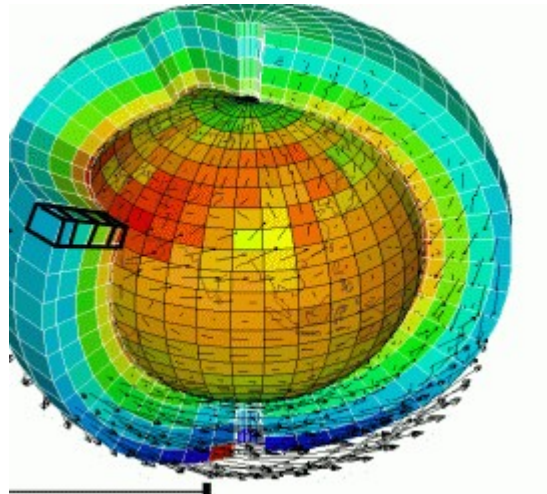


SCM



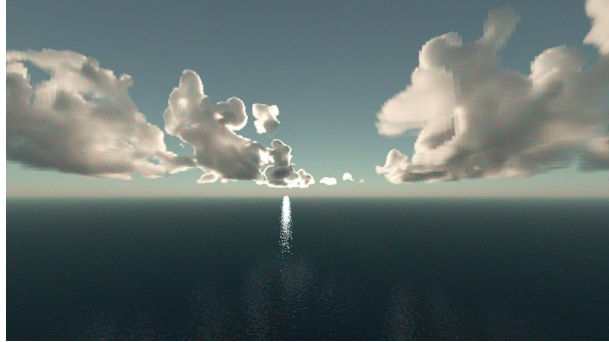
## Calibration Globale:

- métriques radiatives ou scores
- étape clé du développement des modèles
- peu documenté jusqu'à récemment (Hourdin et al 2017)
- souvent via une procédure d'optimisation



# Les nuages de couche limite

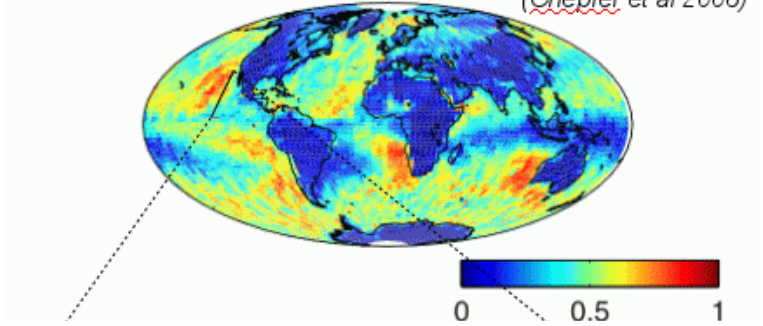
Cumulus



Stratocumulus



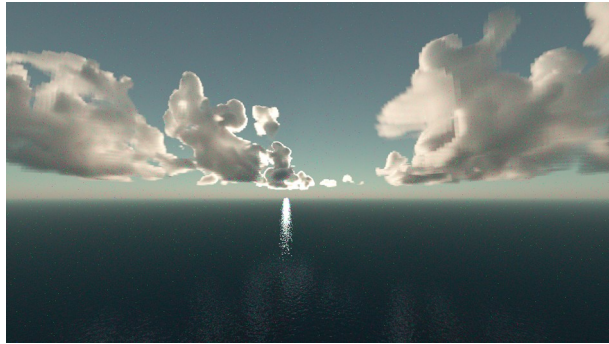
Observations of low cloud cover from CALIPSO  
(Chepfer et al 2008)



Nuages omni-présents surtout  
sur océan

# Les nuages de couche limite

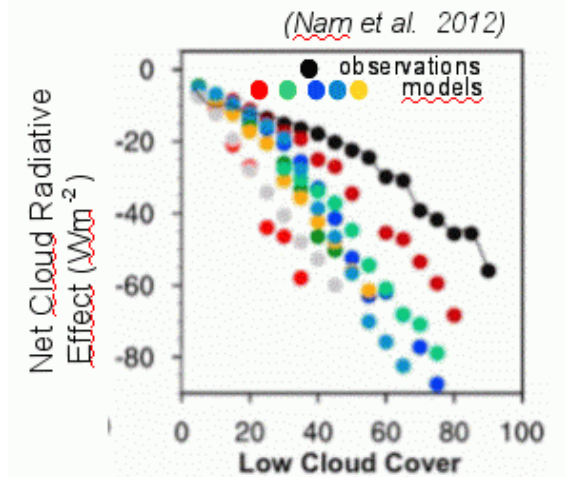
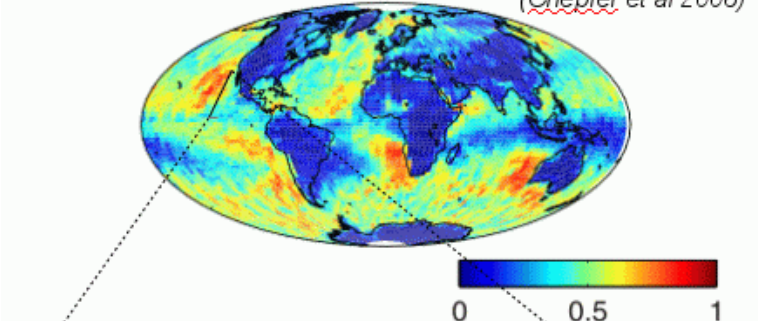
Cumulus



Stratocumulus



Observations of low cloud cover from CALIPSO  
(Chepfer et al 2008)

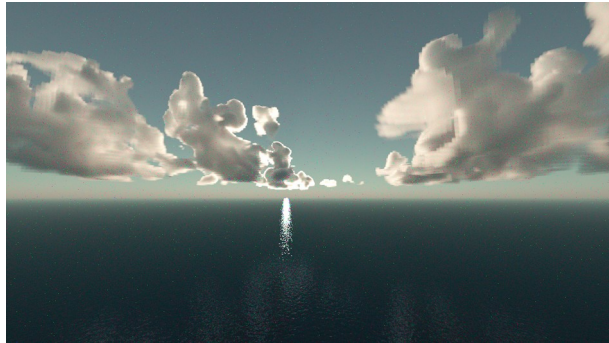


Nuages omni-présents surtout sur océan, responsables des principales incertitudes sur projection climatique



# Les nuages de couche limite : associés à des thermiques

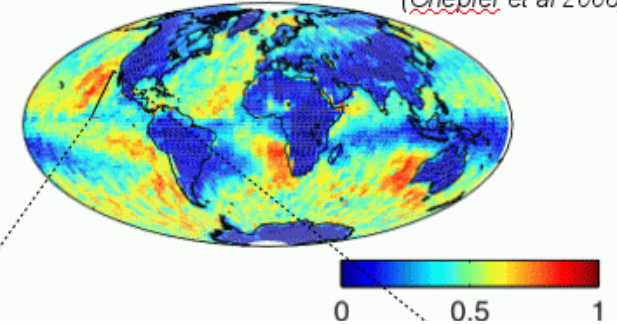
Cumulus



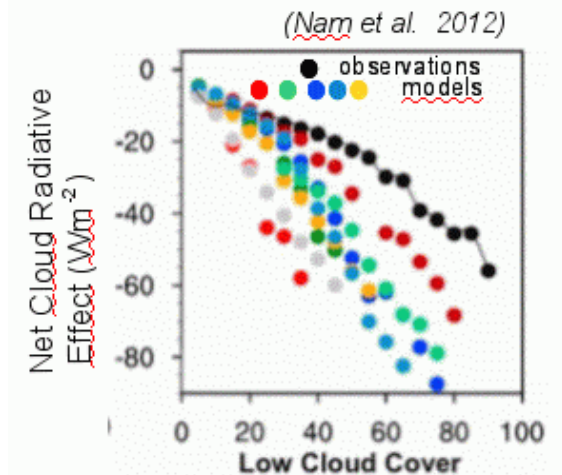
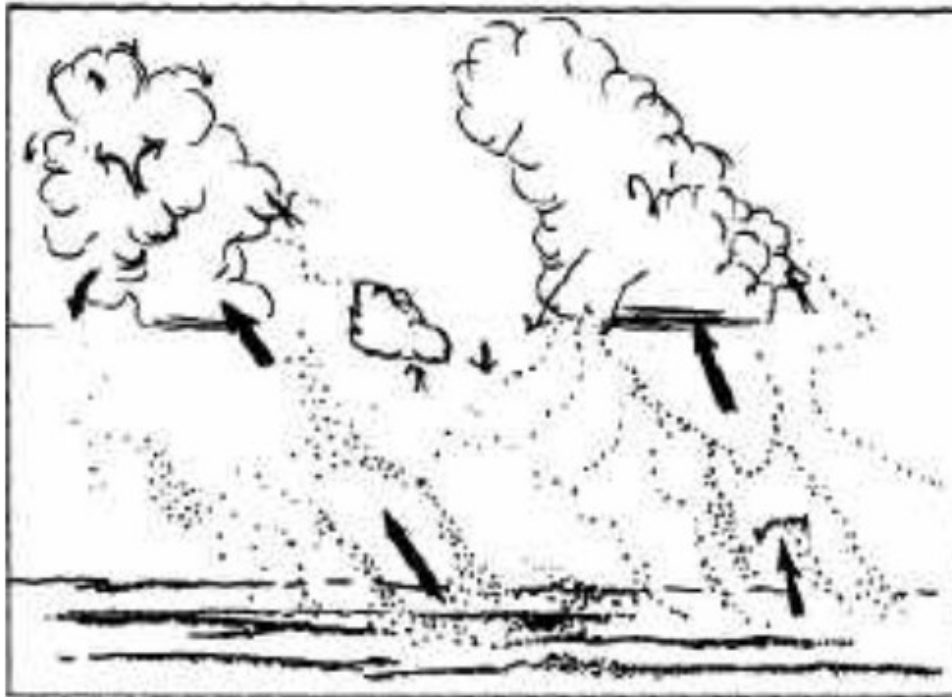
Stratocumulus



Observations of low cloud cover from CALIPSO  
(Chepfer et al 2008)



*LeMone and Pennell, MWR, 1976*



■ Nuages omni-présents surtout sur océan ; effet radiatif global ; Responsable des incertitudes

# L'approche Eddy Diffusivity-Mass Flux

## Le concept :

Représenter le transport vertical d'une variable d'état  $X$

Combinaison d'un schéma en K-diffusion (petits tourbillons) et un schéma en flux de masse (structures cohérentes)

$$\overline{w'X'} = -K \frac{\partial \bar{X}}{\partial z} + M (X_u - \bar{X})$$

## Le schéma en K-diffusion:

Mélange local

Transport selon le gradient

$$\overline{w'X'} = -K \frac{\partial \bar{X}}{\partial z}$$

Cuxart et al, 2002

Mellor & Yamada, 1974

Equation prognostique pour la tke ( $e$ )

Besoin de définir la longueur de mélange

$$K = l \sqrt{e}$$

## Le schéma en flux de masse:

Représentation des structures cohérentes

Reproduit le transport à contre-gradient

Fortes similitudes entre les différentes paramétrisations françaises

$$\overline{w'X'} = M (X_u - \bar{X})$$

Hourdin et al, 2002

Rio and Hourdin, 2008

Rio et al, 2010

Pergaud et al 2009

# Importance de cette paramétrisation

Présente dans tous les modèles français avec  $\Delta x > 1\text{km}$  :

Modèles de prévision numérique du temps : AROME, ARPEGE

Modèles de climat : ARPEGE-Climat , LMDZ

Modèles de recherche Més0-NH (aussi dans WRF)

Introduction du transport non-local : meilleur transport de chaleur, d'humidité et de vent

Pas que pour les nuages bas aussi la convection sèche=> actif même en Antarctique

Vignon et al 2018  
Audouin et al 2021

Responsables de biais et incertitudes sur prévisions:

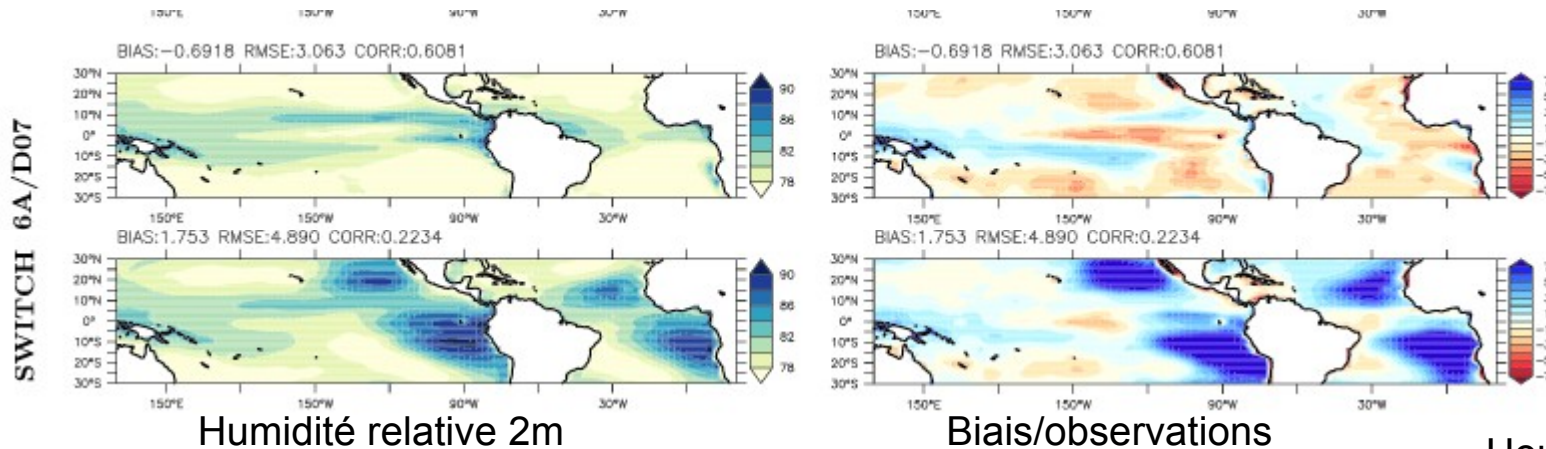
Biais de la couverture nuageuse (NWP + climat) + biais radiatifs associés

Biais dans les variables à 2m

Biais dans les flux de surface

Nam et al 2012  
Hourdin et al 2015  
Brient et al 2019  
Hourdin et al 2020

Deactivation  
Of thermals



Hourdin et al 2020

# Le schéma en Flux de Masse

Un seul thermique moyen stationnaire :  $\alpha_u, w_u, \theta_u, q_u$

$$fm = \rho \alpha_u w_u$$

$$\frac{1}{fm} \frac{\partial fm}{\partial z} = \epsilon - \delta$$

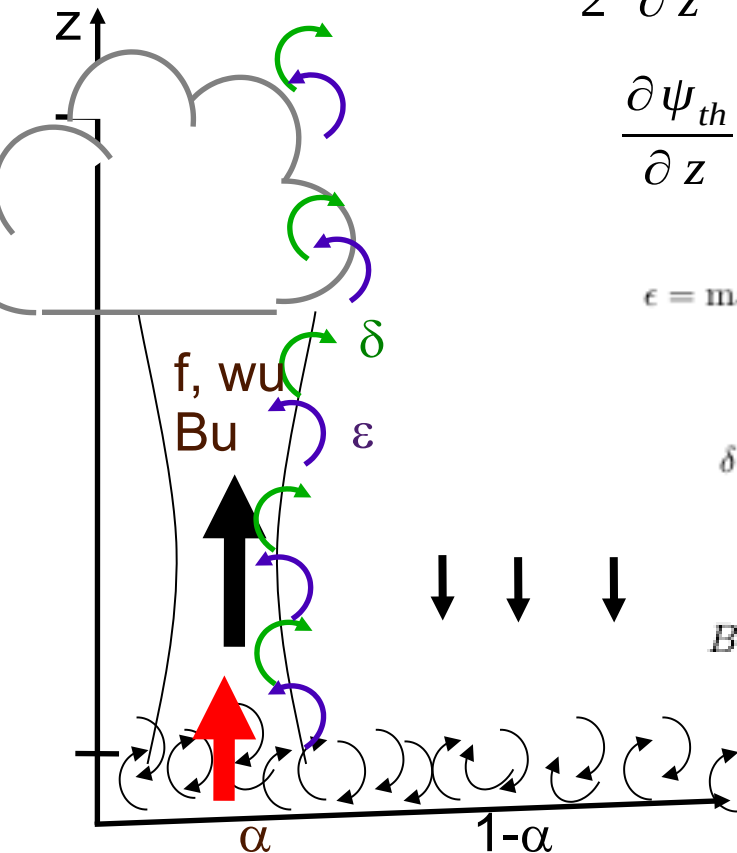
$$\frac{1}{2} \frac{\partial w_u^2}{\partial z} = A1 B - A2 w_{u^2} - \epsilon w_{u^2}$$

$$\frac{\partial \psi_{th}}{\partial z} = \epsilon (\psi - \psi_{th})$$

$$\epsilon = \max \left[ 0, \frac{B1}{1 + B1} \left( A1 \frac{B}{w_{th}^2} - A2 \right) \right]$$

$$\delta = \max \left[ 0, -\frac{A1 \times B1}{1 + B1} \frac{B}{w_{th}^2} + CQ \left( \frac{\Delta q_t / q_t}{(w_{th} / w_0)^2} \right)^D \right]$$

$$B' = g \frac{\theta_{v,th}(z) - \theta_v(z + \delta z)}{\theta_v(z + \delta z)}, \quad \delta z = \mathbf{DZ} \times z,$$



Hourdin et al, 2002 ; Rio and Hourdin, 2008 ;  
Pergaud et al, 2009 ; Hourdin et al, 2019

# Le schéma en Flux de Masse

Comme toute paramétrisation, **une formulation + paramètres libres**

Un seul thermique moyen stationnaire :  $\alpha_u, w_u, \theta_u, q_u$

$$\frac{1}{fm} \frac{\partial fm}{\partial z} = \epsilon - \delta$$

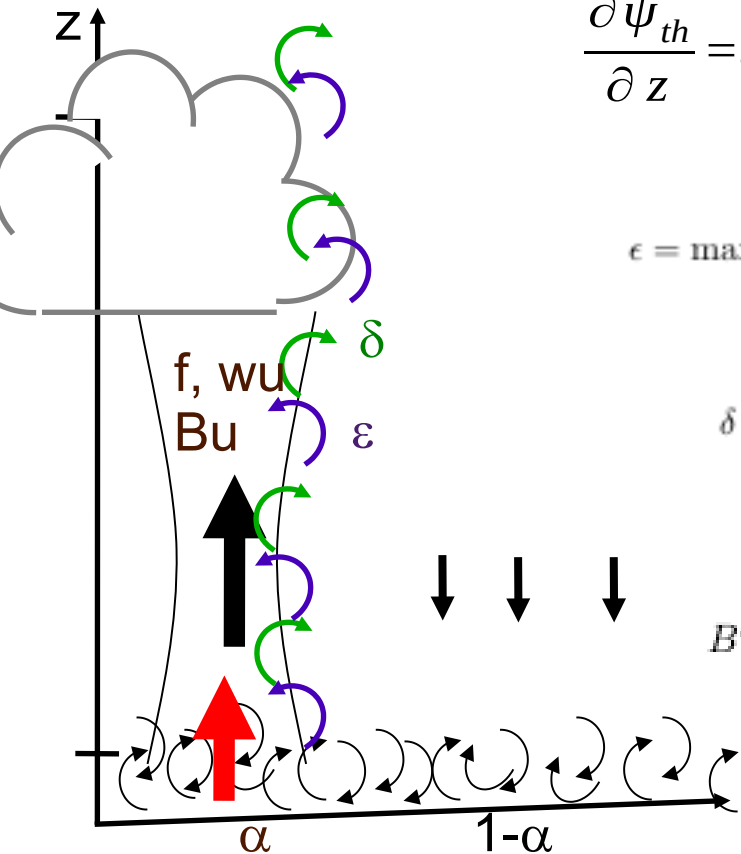
$$\frac{1}{2} \frac{\partial w_u^2}{\partial z} = \textcircled{A1} B - \textcircled{A2} w_{u^2} - \epsilon w_{u^2}$$

$$\frac{\partial \psi_{th}}{\partial z} = \epsilon (\psi - \psi_{th})$$

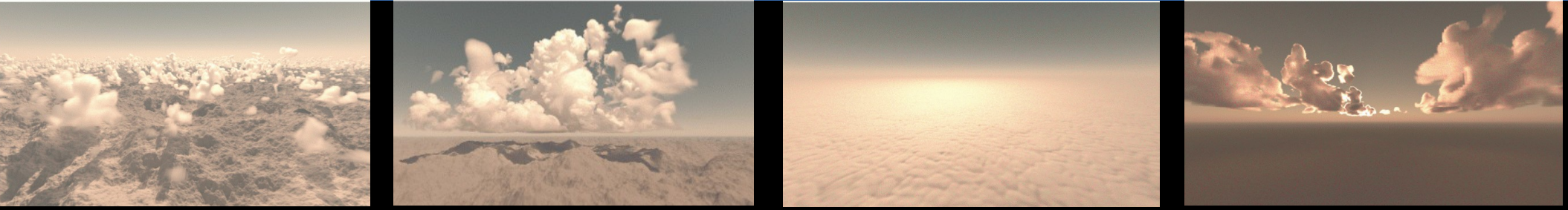
$$\epsilon = \max \left[ 0., \frac{\textcircled{B1}}{1 + \textcircled{B1}} \left( \textcircled{A1} \frac{B}{w_{th}^2} - \textcircled{A2} \right) \right]$$

$$\delta = \max \left[ 0., -\frac{\textcircled{A1} \textcircled{B1}}{1 + \textcircled{B1}} \frac{B}{w_{th}^2} + \textcircled{CQ} \frac{\Delta q_t / q_t}{(w_{th} / w_0)^2} \right]^D$$

$$B' = g \frac{\theta_{v,th}(z) - \theta_v(z + \delta z)}{\theta_v(z + \delta z)}, \quad \delta z = \textcircled{DZ} \times z,$$



Hourdin et al, 2002 ; Rio and Hourdin, 2008 ;  
Pergaud et al, 2009 ; Hourdin et al, 2019



1. Les paramétrisations physiques : origine, rôle
- 2. Utilisation de simulations haute résolution pour guider leur développement**
3. Développement d'un outil de calibration orientée processus
4. Conclusion

# Des modèles de référence: les simulations LES

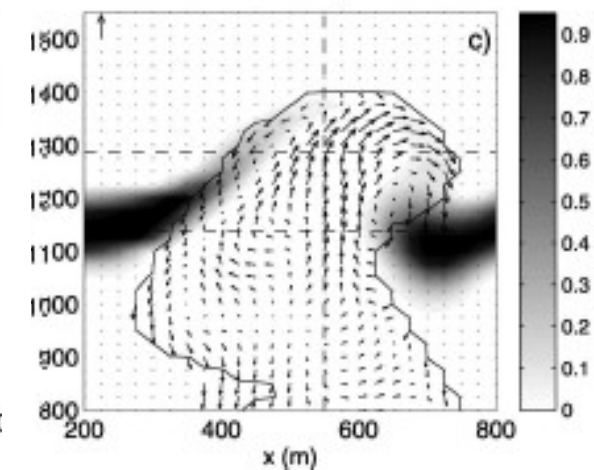
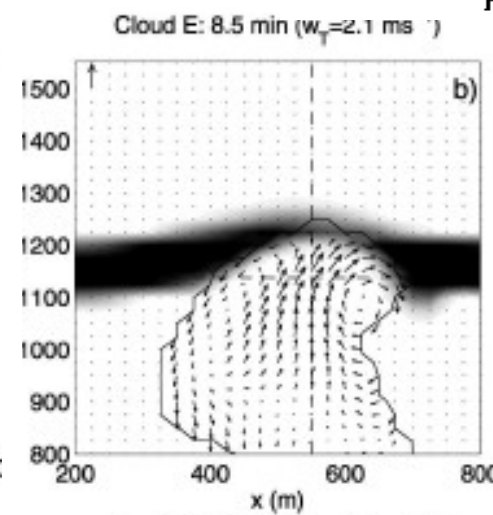
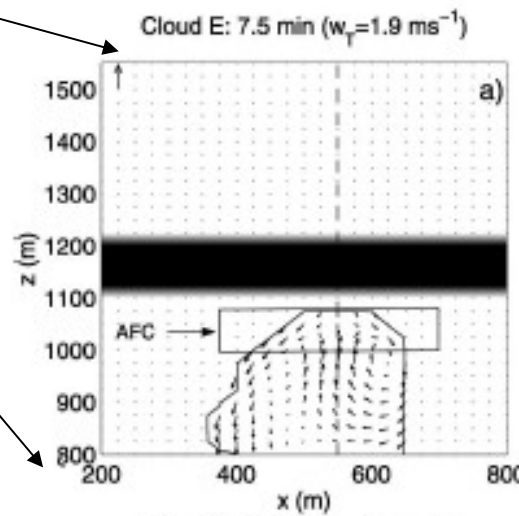
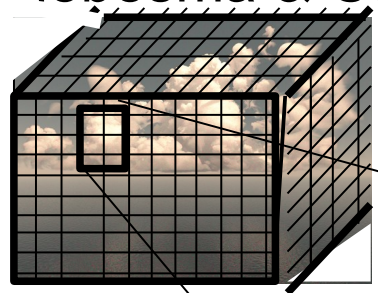
## - Résolution explicite :

Résolution ~ qqs dizaines de mètres

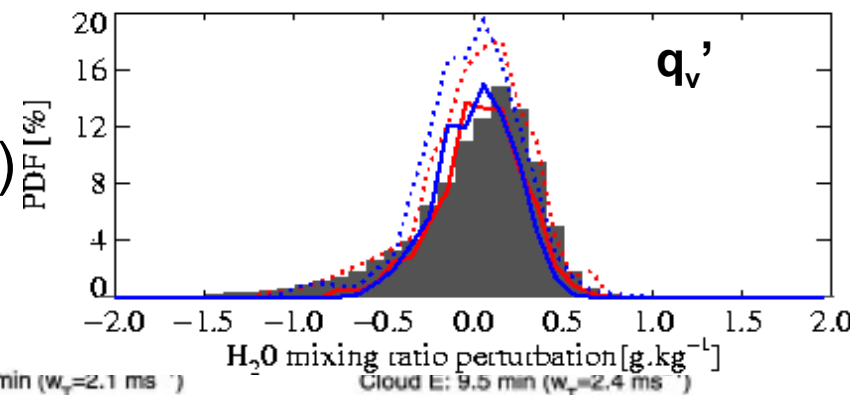
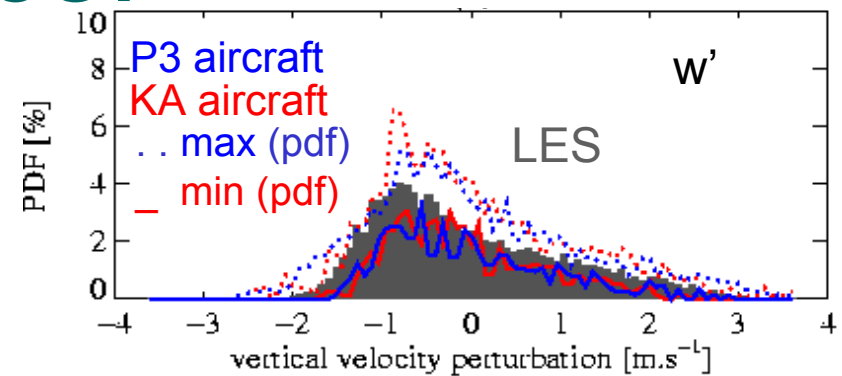
Résout les principales structures

turbulentes (Couvreur et al 2005), la  
dynamique et morphologie des nuages

(Siebesma & Cuijpers 95, Neggers et al 2003...)

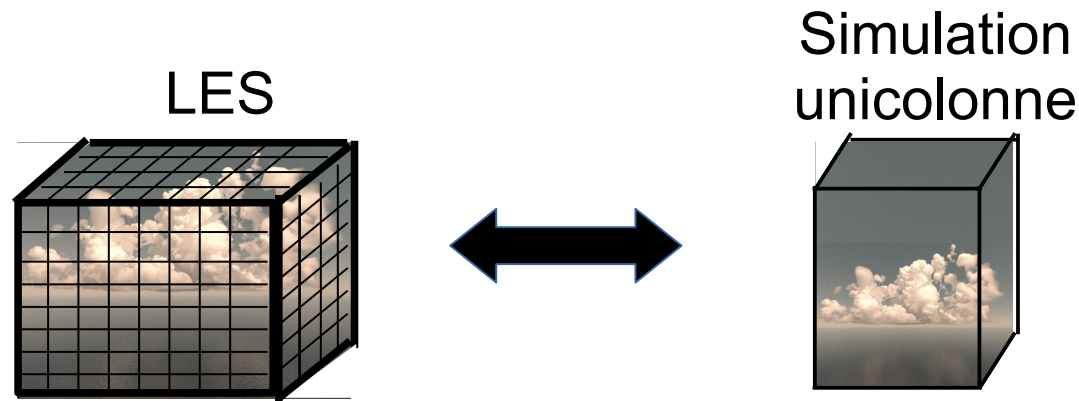


Zhao and Austin, 2005



Caractérisation du mélange entre nuages et environnement, très  
difficile à observer

# LES/SCM, un cadre éprouvé



- SCM=Single Column Model : extraction d'une colonne atmosphérique d'un modèle 3D qui intègre l'ensemble des paramétrisations physiques: rapide et **faible coût**
- LES=Large Eddy Simulations : simulation qui résout explicitement l'essentiel des processus (reste paramétrisations de la turbulence/microphysique/surface/rayonnement) : **référence**
- Exactement les mêmes conditions initiales et les mêmes forçages (en surface et de grande échelle) => comparaison directe + diagnostics orientés paramétrisations
- Intermédiaire / comparaison directe observations/modèle
- Aucune interaction avec la dynamique (focus sur les paramétrisations)
- Possibilité de réaliser les mêmes tests de sensibilité
- Un cadre largement utilisé pour l'évaluation et le développement des paramétrisations (Randall et al, 1996 ; GCSS ; Siebesma and Cuijpers 1995 ; Hourdin et al, 2013)
- Représentatif des principaux biais du modèle 3D (Neggers et al 2015, Gettleman et al 2019)



# Evaluation des modèles

- Combiner une batterie de cas couvrant les différents régimes de couche limite
- Mise au point d'un format commun d'input/output

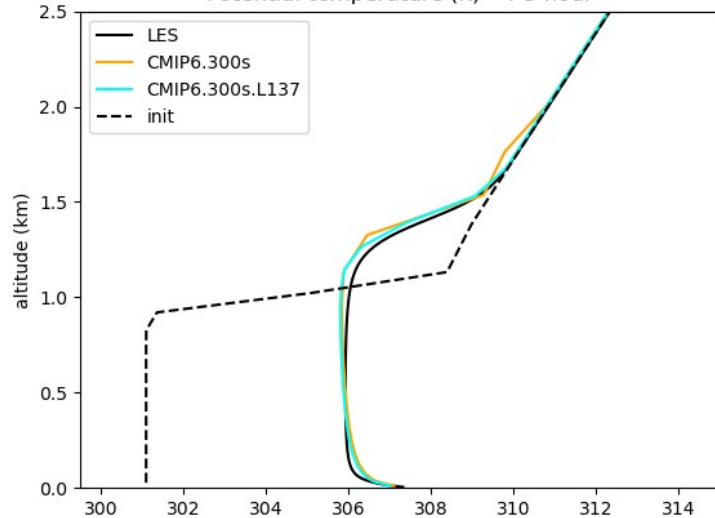
Modèle CNRM

Roehrig et al 2021

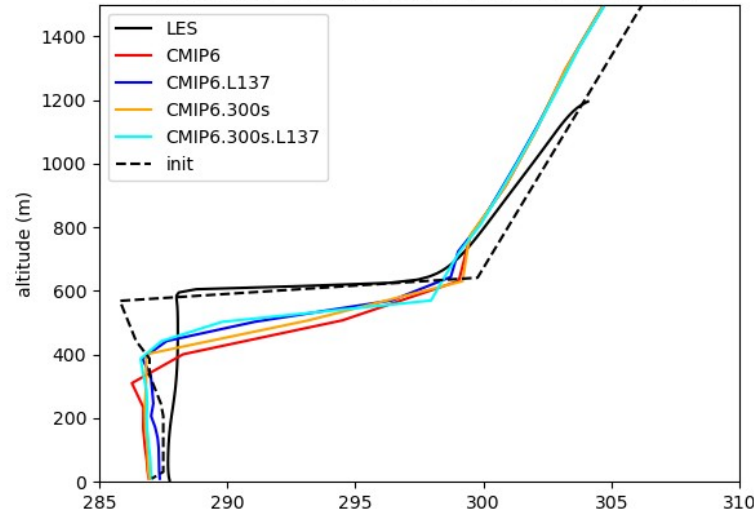
FIRE  
Stratocumulus

AYOTTE – Idealized Convective dry BL

Potential temperature (K) - 4-5 hour



Liquid-Water Potential Temperature (K) - 11-12 hour

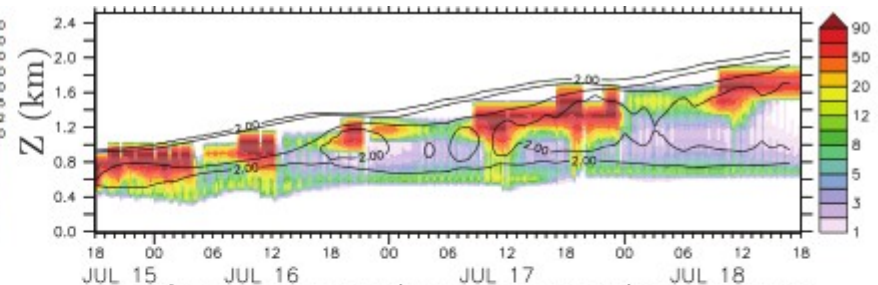
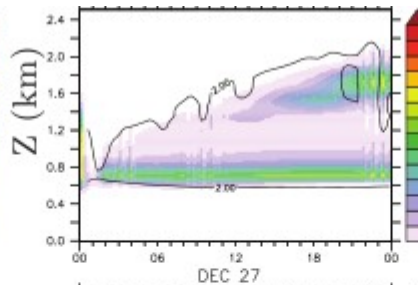
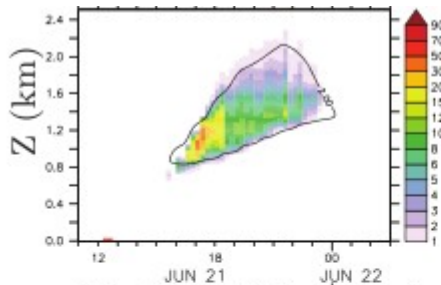


Modèle LMDZ6

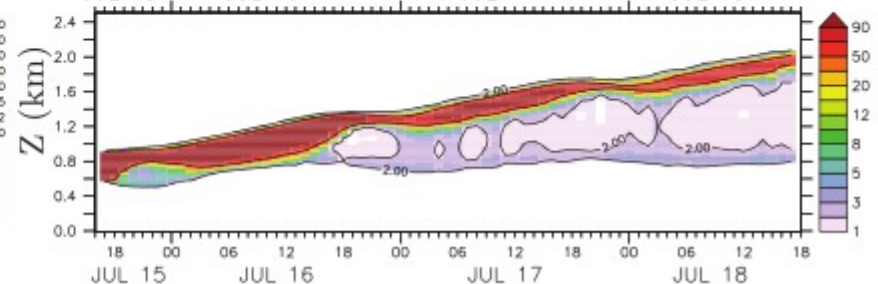
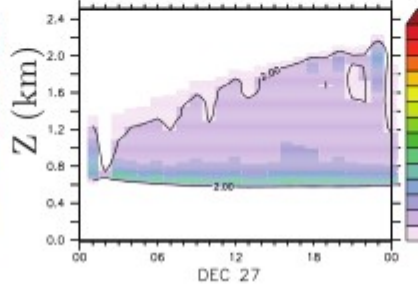
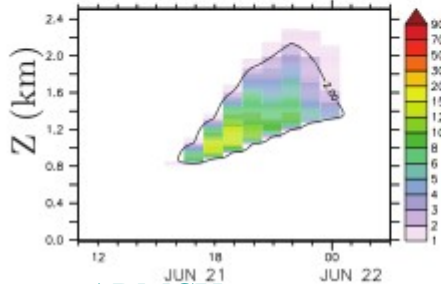
Hourdin et al 2020

SCM

6A, L79  
 $\Delta t$   
15min =



LES



ARMCU  
Continental cumulus

RICO  
Oceanic cumulus

SANDU  
Stratocumulus to cumulus transition

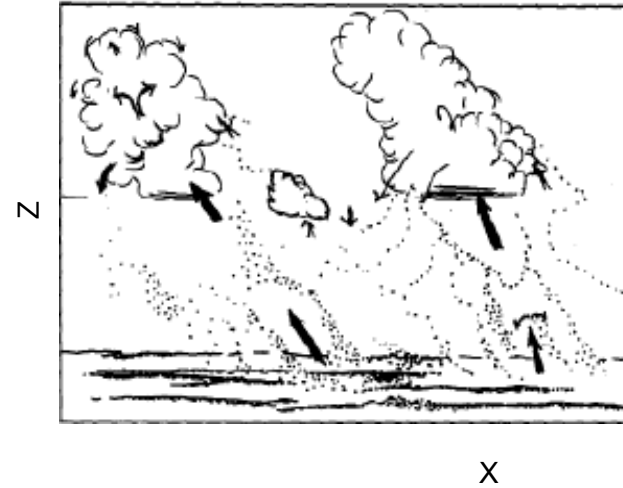
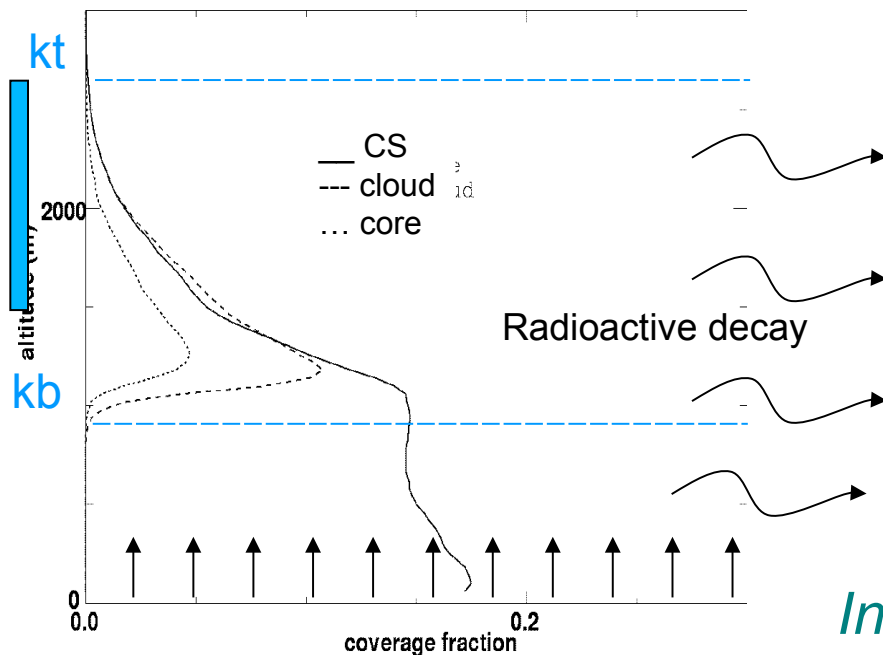
# Diagnostiques orientés paramétrisation

Traceur émis au sol avec un Temps de vie donné

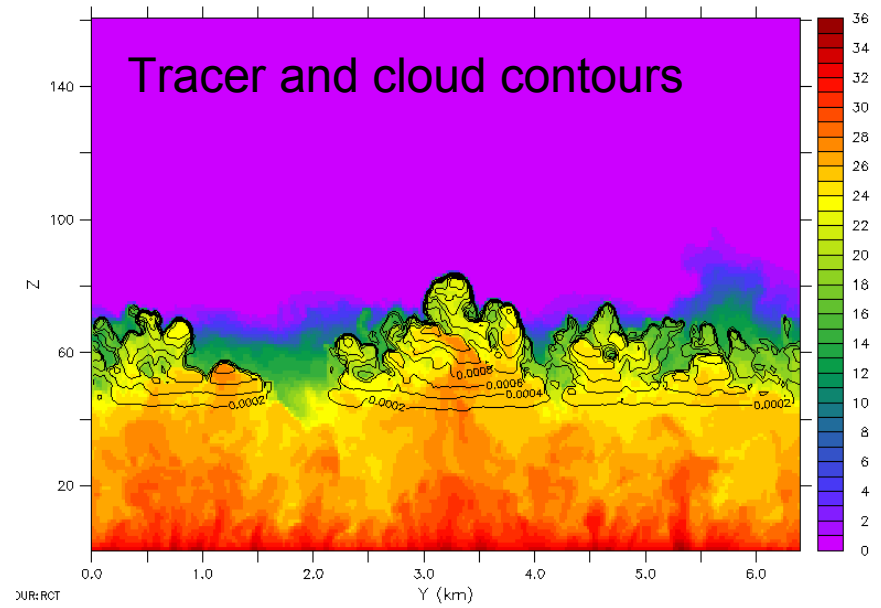
Thermiques:

$$s' > m \times \max(\sigma_s, \sigma_{\min}) + w > 0$$

+  $q_l > 0$  in the upper  $\frac{3}{4}$  of the clouds



“cumulus are the saturated, visible part of updrafts rooted in the subcloud layer...”  
LeMone and Pennell (1976)



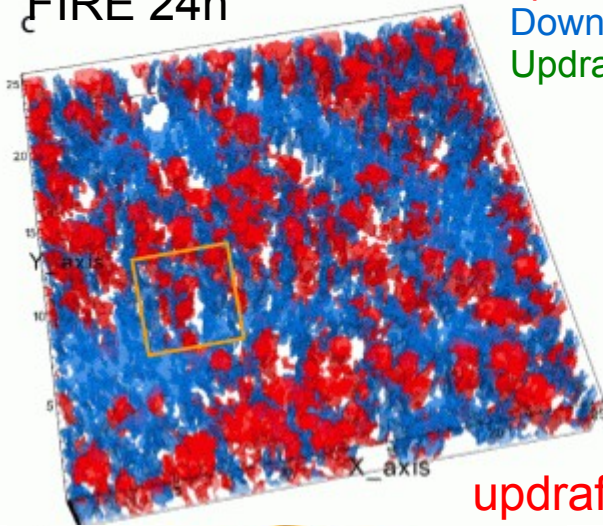
*Inspiration pour les paramétrisations  
Test d'hypothèses*

Couvreux et al., BLM, 2010

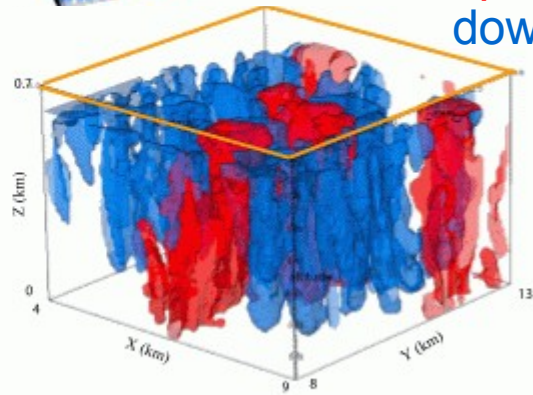
# Structures cohérentes

updraft  
 Downdraft  
 Updraft and downdraft

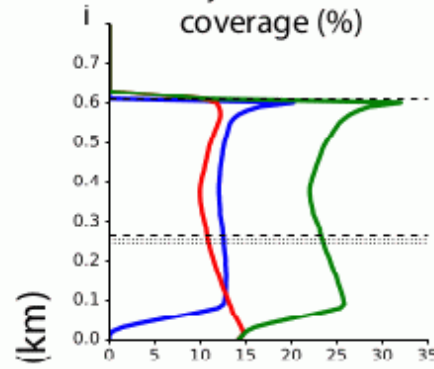
FIRE 24h



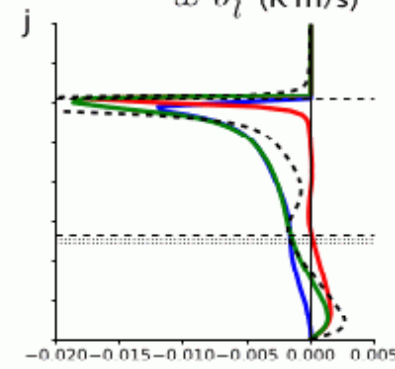
updraft  
 downdraft



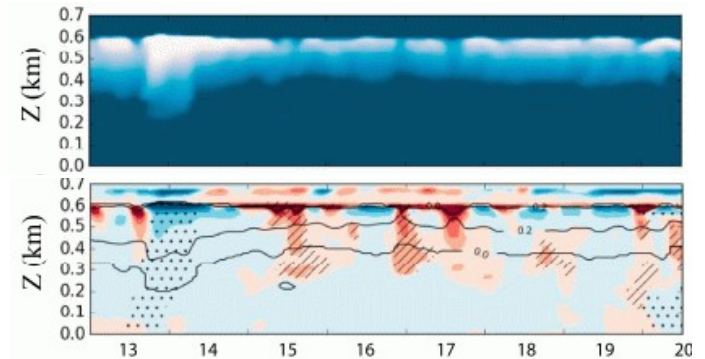
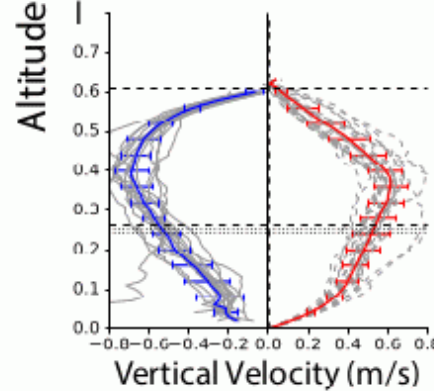
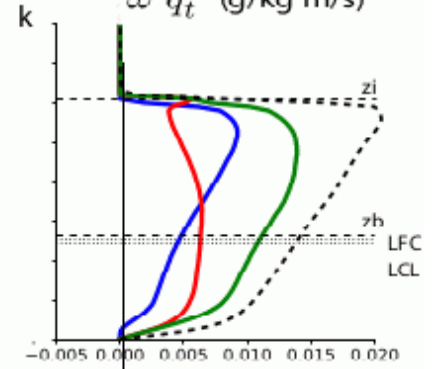
Object relative coverage (%)



$\overline{\omega' \theta'_t}$  (K m/s)



$\overline{\omega' q'_t}$  (g/kg m/s)



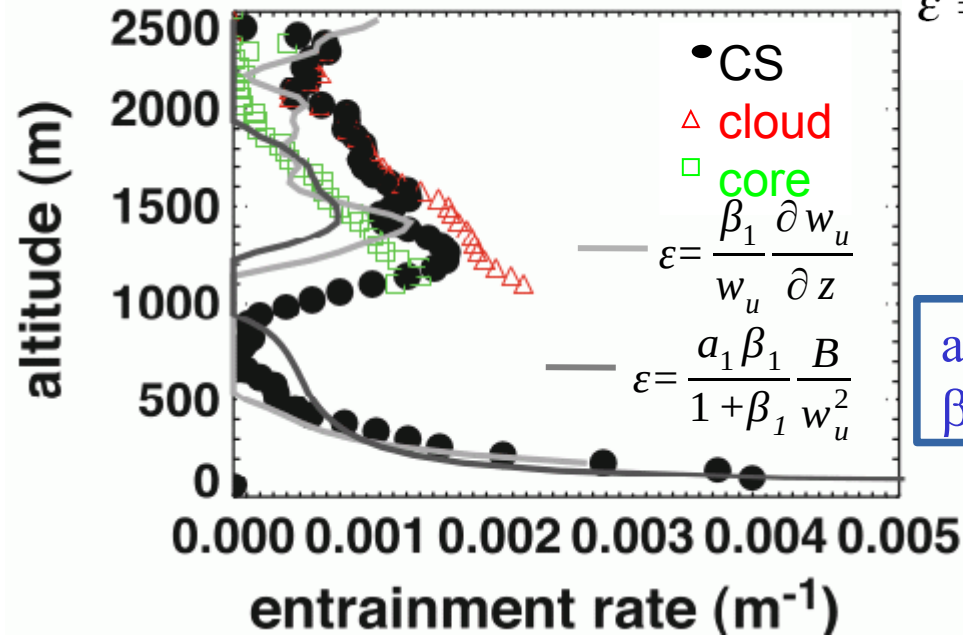
Brient et al., GRL, 2019

- Structures cohérentes de couche limite identifiées en tant qu'objets en utilisant des traceurs passifs dans différentes simulations LES
- Dans les cas de stratocumulus, downdrafts et updrafts contribuent significativement aux transports de chaleur et d'humidité, malgré leur faible couverture spatiale

# Test de formulation :

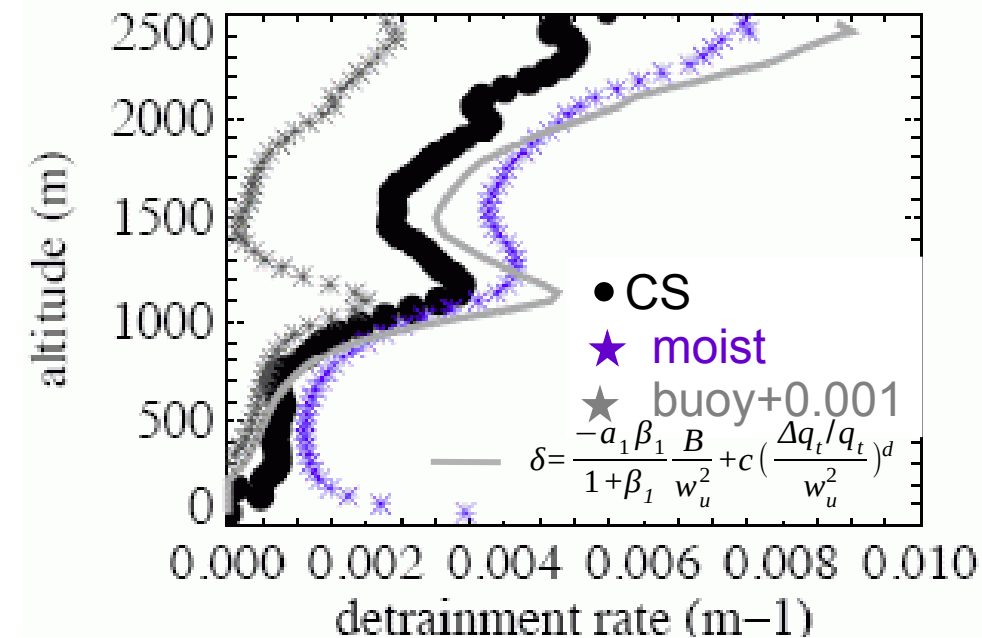
ARM 9

$$\varepsilon = \frac{1}{\psi - \psi_u} \frac{\partial \psi_u}{\partial z}$$



Diagnostiqués dans les LES  
=> Evaluation

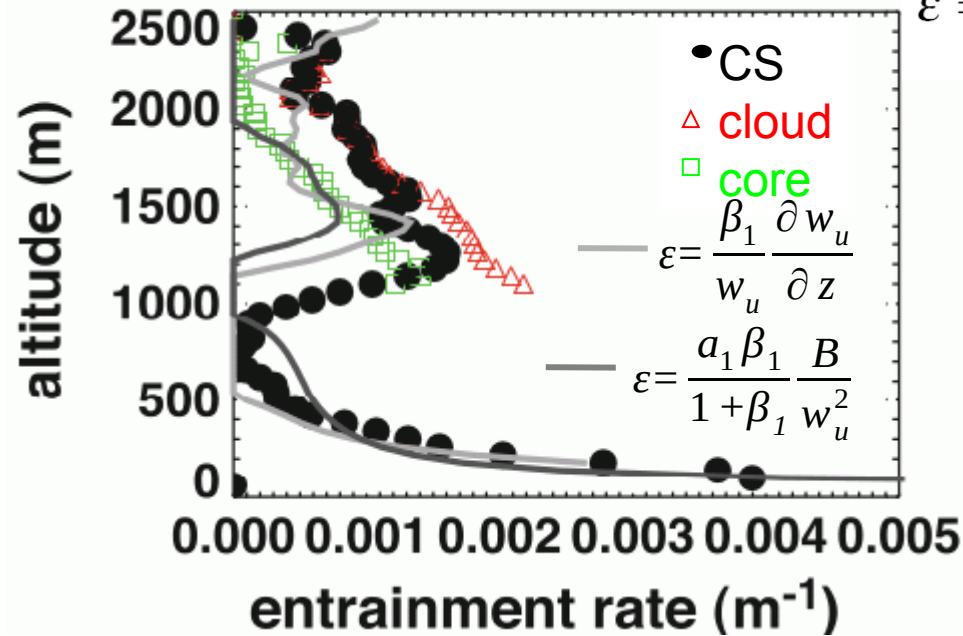
ARM 9



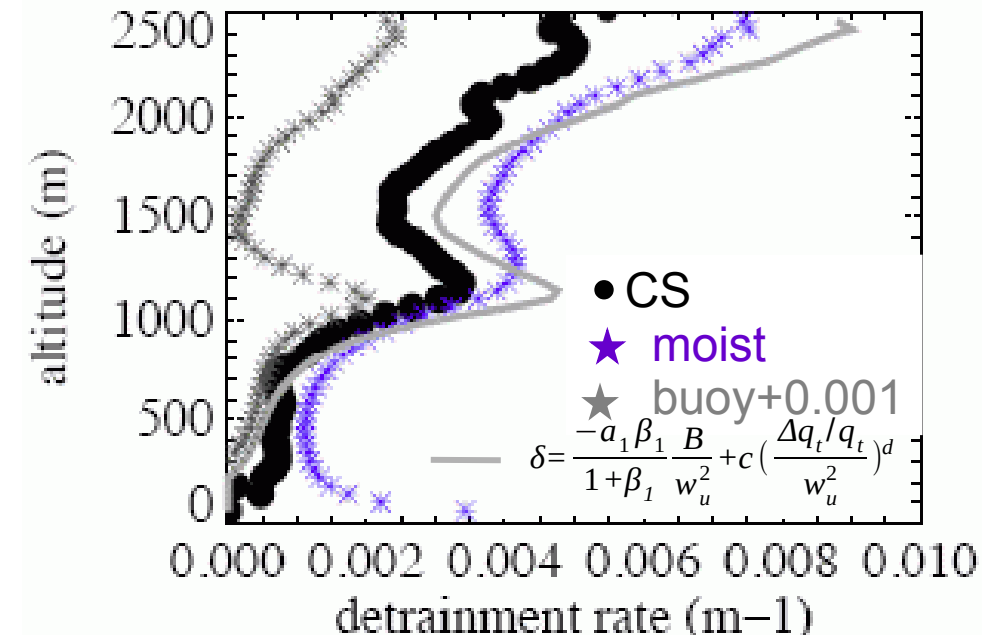
# Test de formulation :

ARM 9

$$\varepsilon = \frac{1}{\psi - \psi_u} \frac{\partial \psi_u}{\partial z}$$

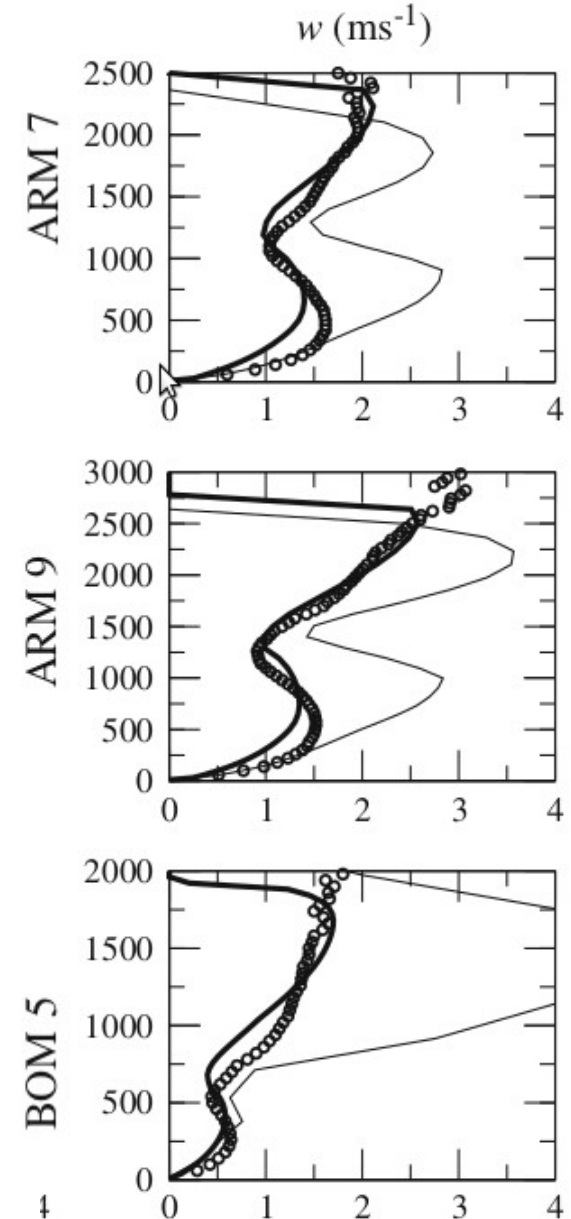


ARM 9



## Test de formulations en 1D

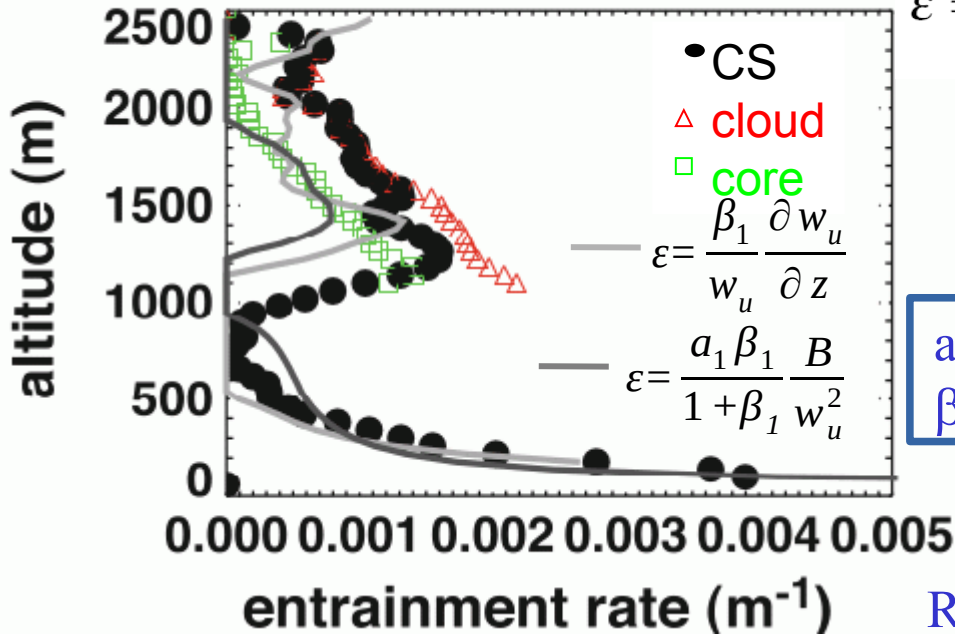
▸ LES — TH — TH new



# Test de formulation :

ARM 9

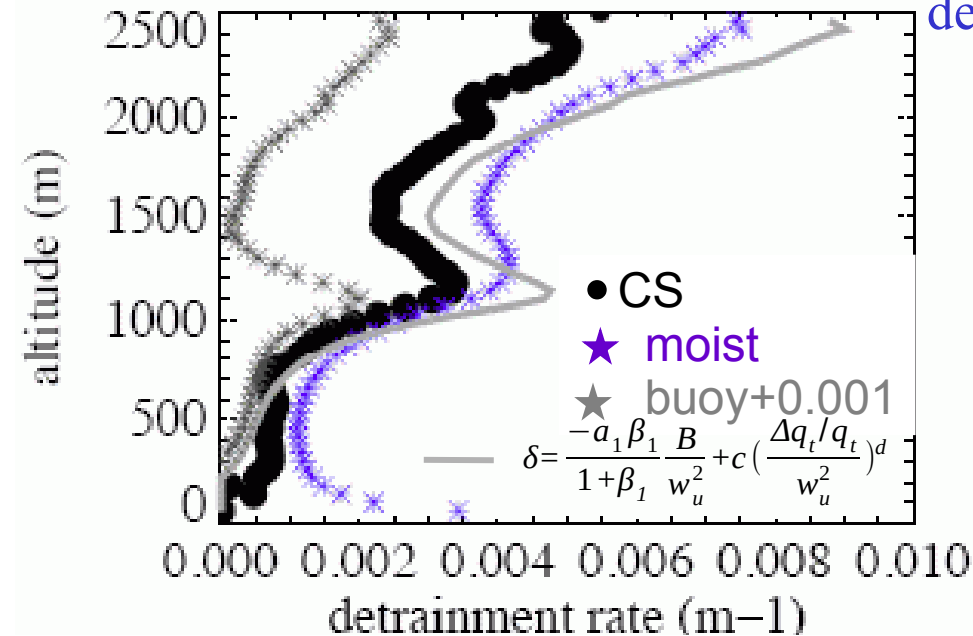
$$\varepsilon = \frac{1}{\psi - \psi_u} \frac{\partial \psi_u}{\partial z}$$



$a_1=2/3$   
 $\beta_1=0.9$

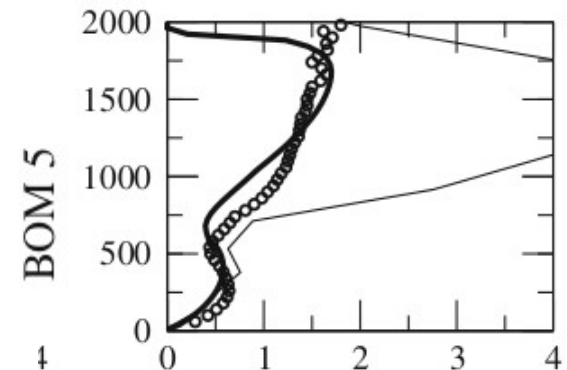
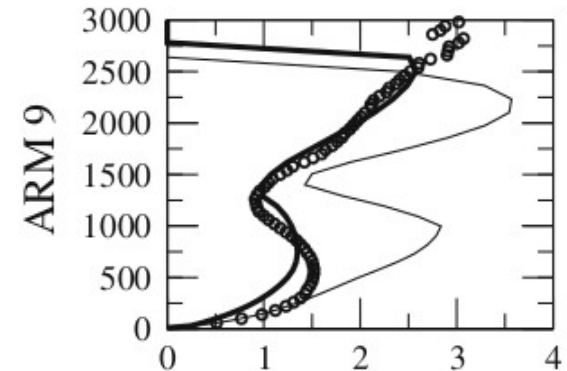
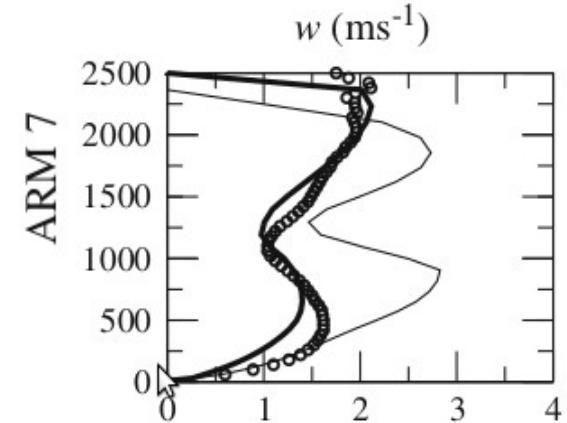
Revisiter le cadre  
1D/LES à des fins  
de calibrations

ARM 9

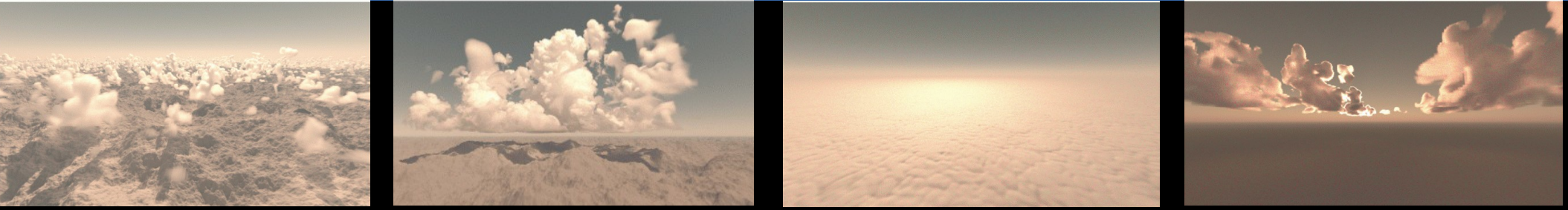


## Test de formulations en 1D

▸ LES — TH — TH new



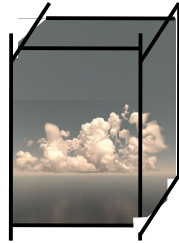
Rio et al. blm 2010



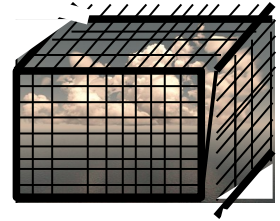
1. Les paramétrisations physiques : origine, rôle
2. Utilisation de simulations haute résolution pour guider leur développement
- 3. Développement d'un outil de calibration orientée processus**
4. Conclusion

# Un outil de calibration orienté processus

Simulation 1D



Reference LES



Un outil de calibration basé sur des approches d'apprentissage machine  
History Matching=> rejet progressif des valeurs impossibles  $\neq$  optimisation

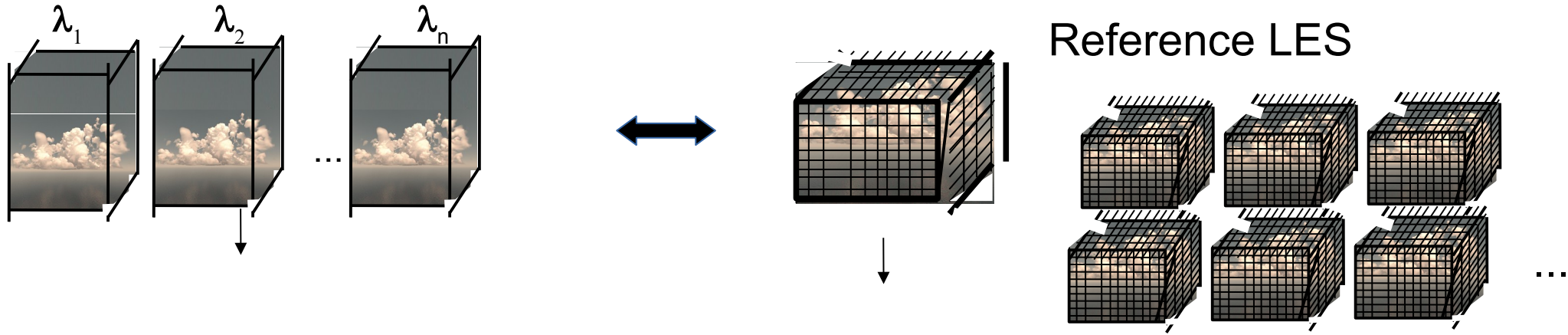
Définir le sous-espace des valeurs de paramètres pour lesquelles les simulations 1D s'accordent aux LES pour une sélection de métriques sur un ensemble de cas et pour une incertitude donnée



# Un outil de calibration orienté processus

Selection des **métriques** [combinaison de différents cas et métriques]

Identification des **paramètres libres** et de leur gamme de variation a-priori

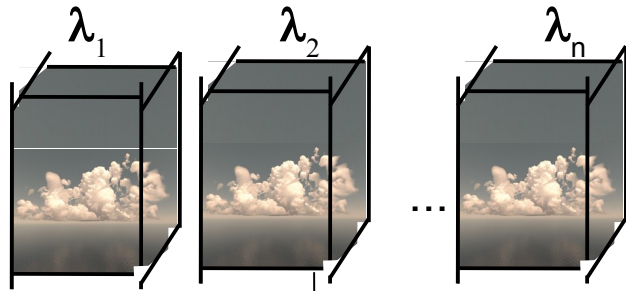


Définir le sous-espace des valeurs de paramètres pour lesquelles les simulations 1D s'accordent aux LES pour une sélection de métriques sur un ensemble de cas et pour une incertitude donnée

# Un outil de calibration orienté processus

Selection des **métriques** [combinaison de différents cas et métriques]

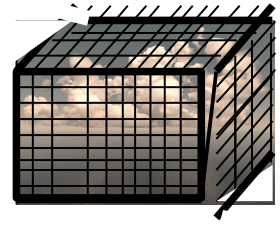
Identification des **paramètres libres** et de leur gamme de variation a-priori



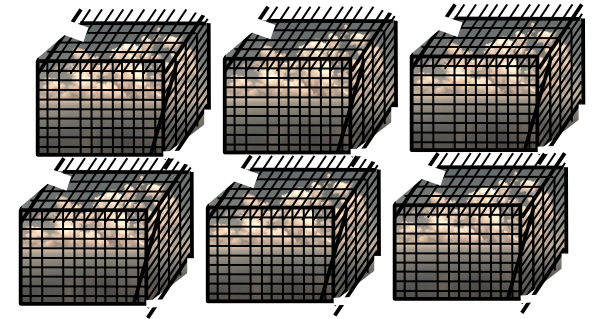
Métriques 1D = apprentissage

↓ émulateur

métriques pour tout  $\lambda \pm$   
incertitude



Reference LES

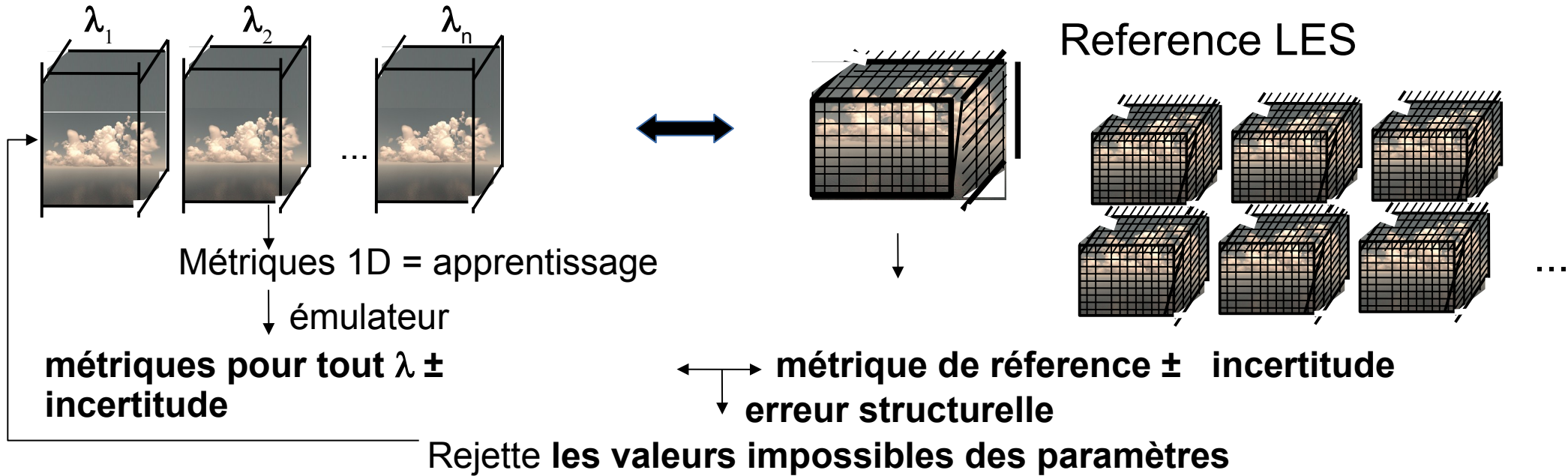


←→ métrique de référence  $\pm$  incertitude

# Un outil de calibration orienté processus

Selection des **métriques** [combinaison de différents cas et métriques]

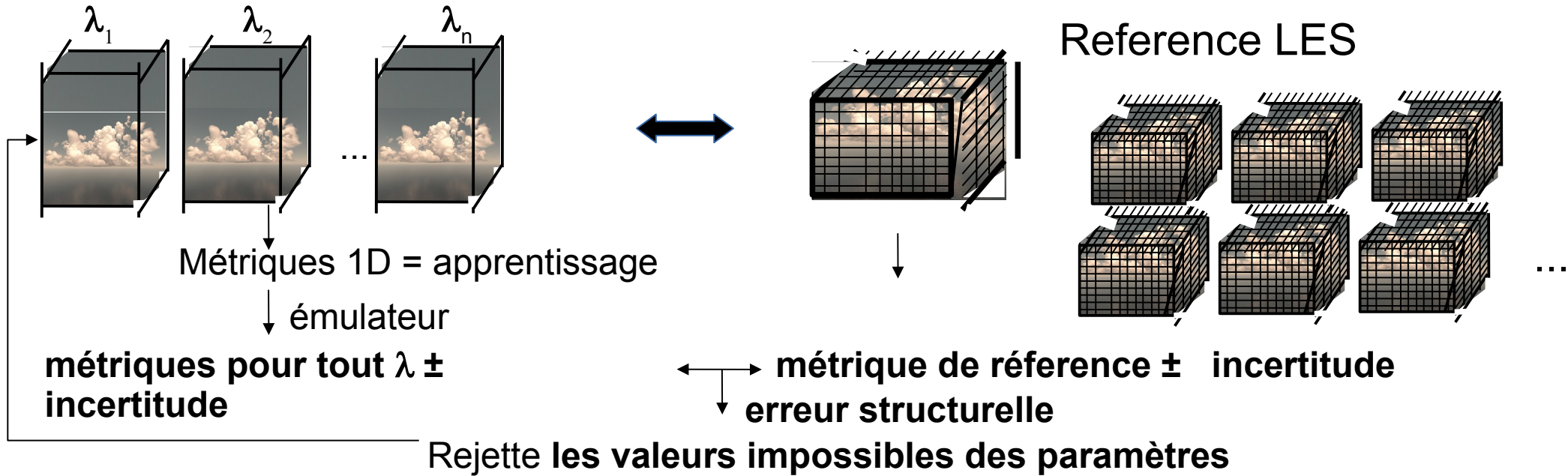
Identification des **paramètres libres** et de leur gamme de variation a-priori



# Un outil de calibration orienté processus

Selection des **métriques** [combinaison de différents cas et métriques]

Identification des **paramètres libres** et de leur gamme de variation a-priori



## *History matching with iterative refocusing (Williamson et al 2013)*

- Approche Machine learning pour la calibration (UQ)
- Exploration extensive de l'espace des paramètres avec l'émulateur
- Prise en compte des différentes sources d'incertitudes: erreur d'observation, erreur de l'émulateur et la tolérance à l'erreur ou l'erreur structurelle pour éviter des compensations
- Méthode itérative : rejette progressivement les valeurs impossibles (possibilité d'ajout de cas)

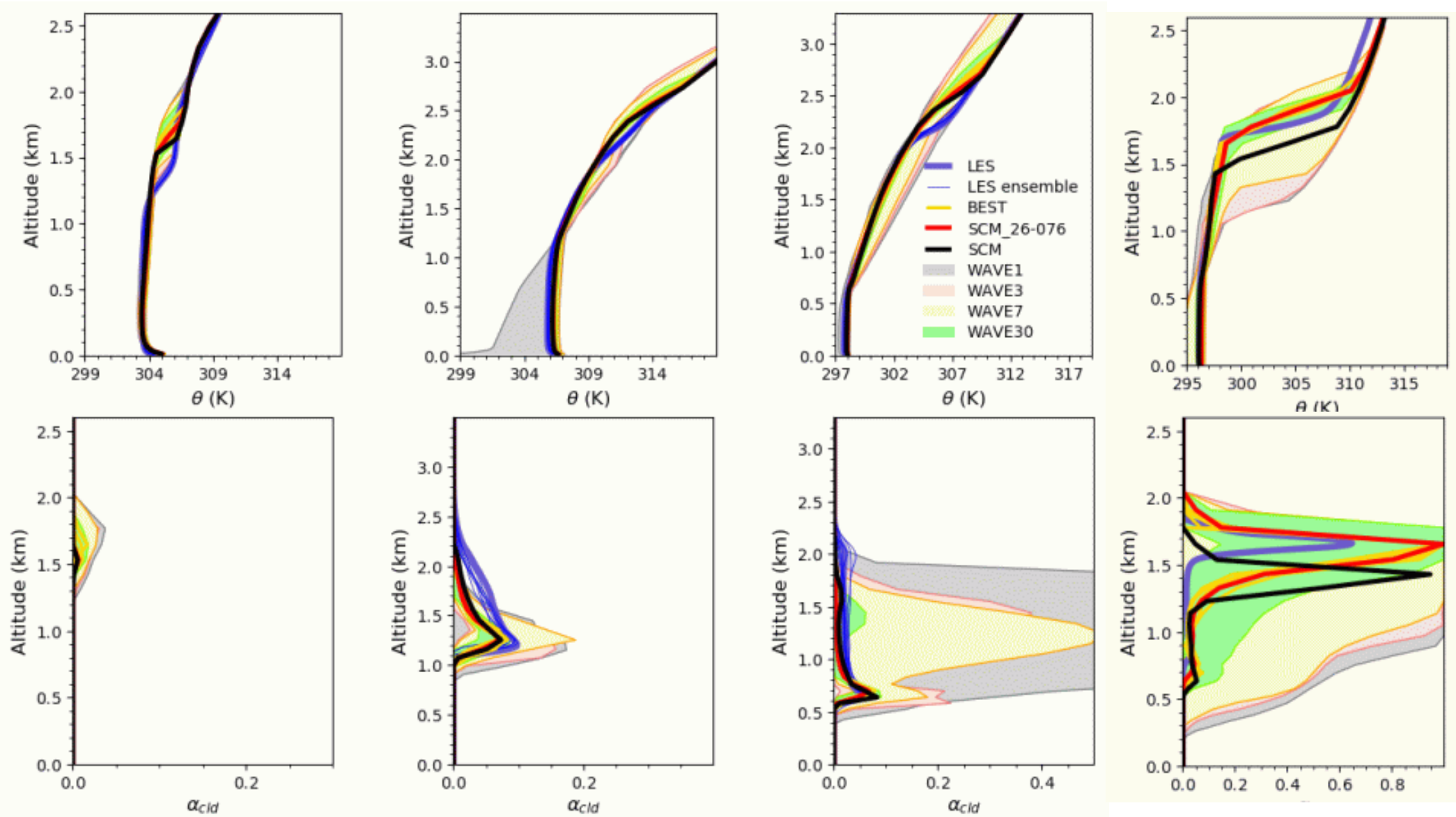
# Application de l'outil

Dry convective BL  
IHOP

Continental shallow cu  
ARMCU

Oceanic shallow cu  
RICO

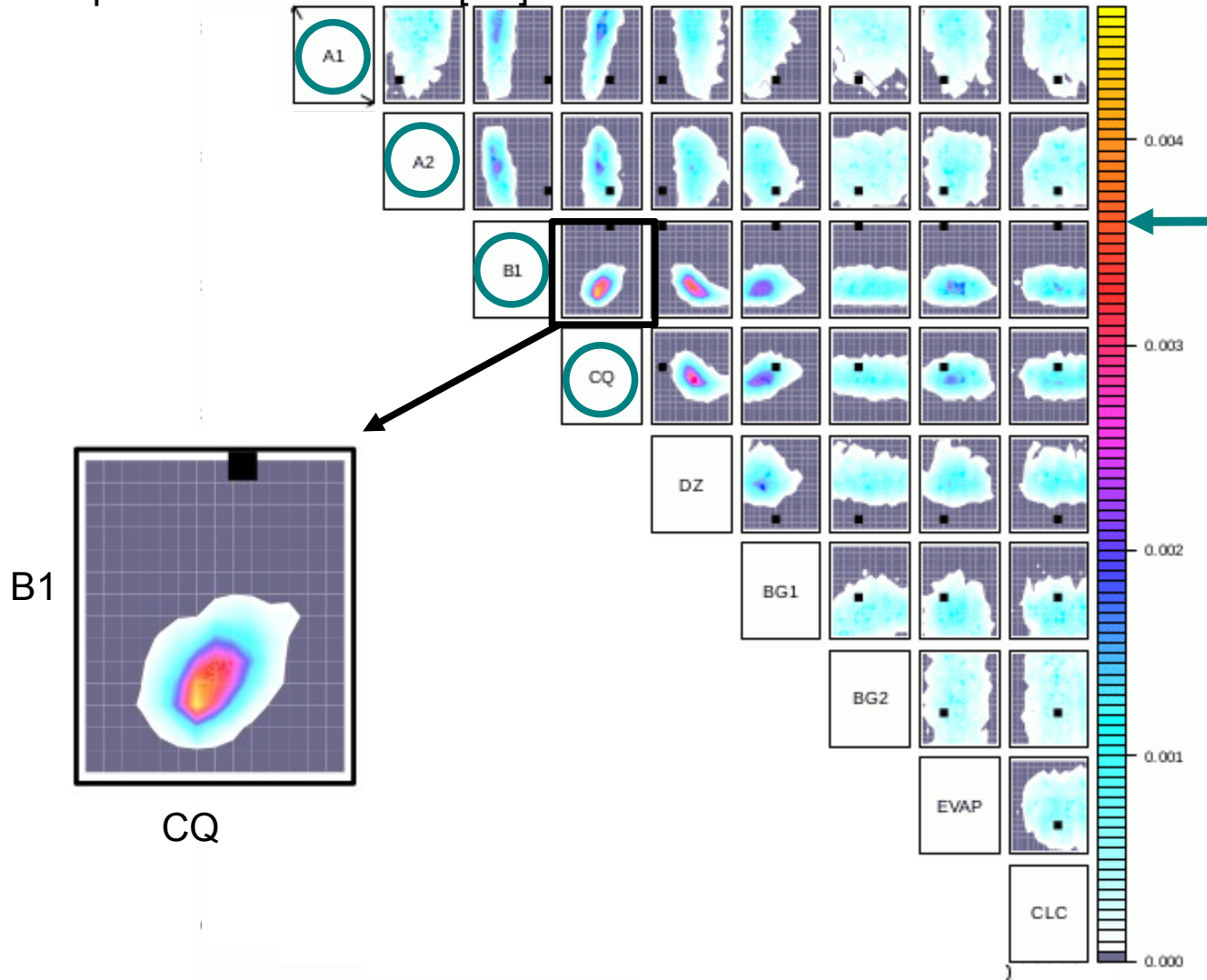
Transition Stocu to Cu  
SANDU



LMDZ  
 5 Metrics :=  $\int \theta(z) dz$   $\bar{q} v = \int qv(z) dz$   $z_{cld,ave} = \frac{\int cf(z) dz}{\int cf(z) dz}$   $z_{cld,max} = z_{telque\max}(cf)$   $cld_{max} = \max(cf(z))$  *Hourdin et al, 2021*  
 9 Parameters : Mass-flux scheme+ Cloud scheme +autoconversion+ reevaporation of rain

# Application de l'outil

NROY space after 30 Waves [1D]



$$I_f(\tilde{\lambda}) = \frac{|r_f - \mathbf{E}[f(\tilde{\lambda})]|}{\sqrt{\sigma_{r,f}^2 + \sigma_{d,f}^2 + \sigma_f(\tilde{\lambda})^2}}$$

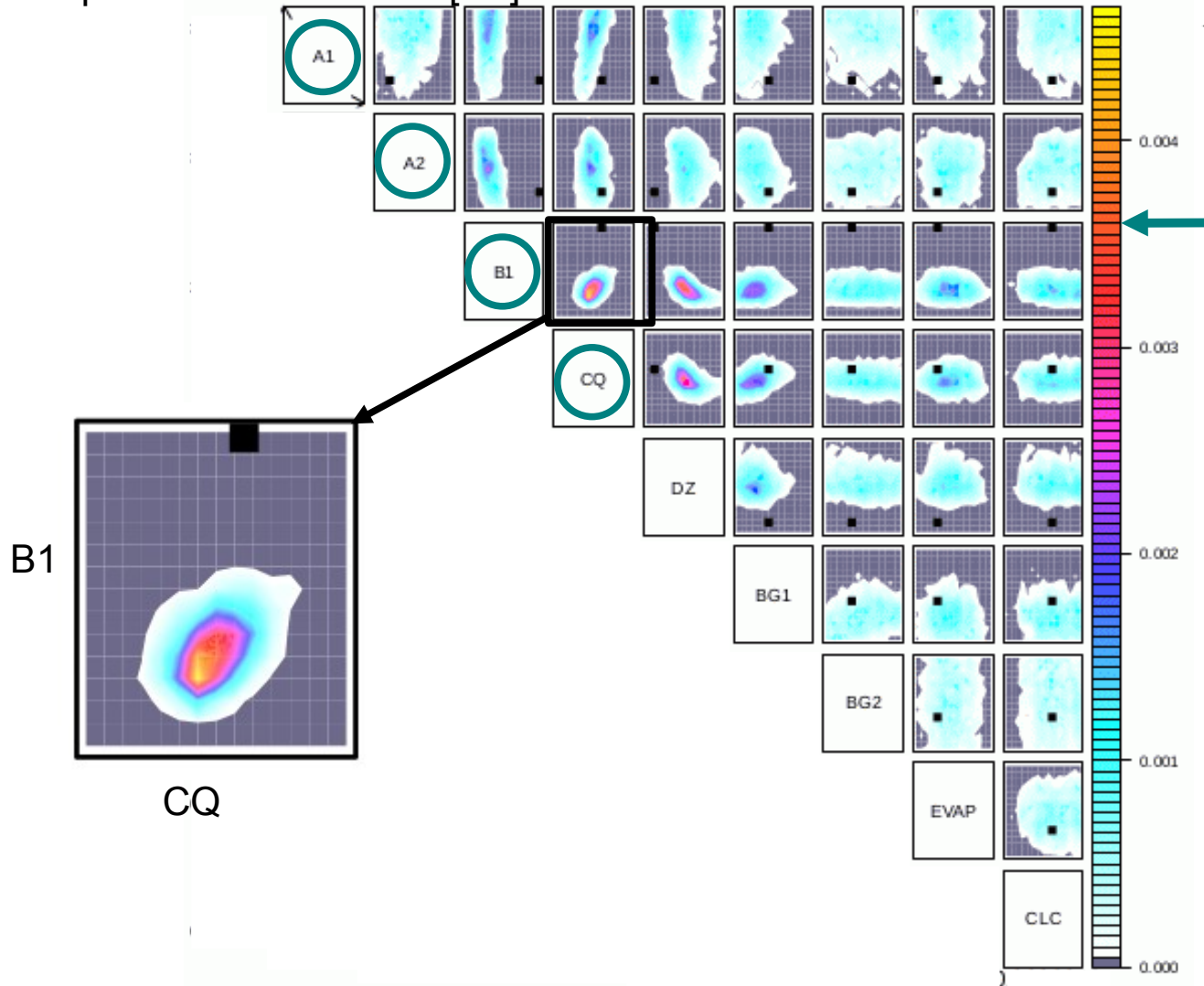
$$\text{NROY}_f^1 = \{\lambda \mid I_f(\lambda) < T\}$$

Fraction of the Not Ruled Out Yet (NROY) points when varying other parameters

LMDZ  
 Metrics :  $\int \theta(z) dz$   $\bar{q} v = \int qv(z) dz$   $\bar{q} v = \int qv(z) dz$   $z_{cld,ave} = \frac{\int cf(z) dz}{\int cf(z) dz}$   $cld_{max} = \max(cf(z))$   
 9 Parameters : Mass-flux scheme+ Cloud scheme +autoconversion+ reevaporation of rain

# Application de l'outil

NROY space after 30 Waves [1D]



$$I_f(\tilde{\lambda}) = \frac{|r_f - \mathbf{E}[f(\tilde{\lambda})]|}{\sqrt{\sigma_{r,f}^2 + \sigma_{d,f}^2 + \sigma_f(\tilde{\lambda})^2}}$$

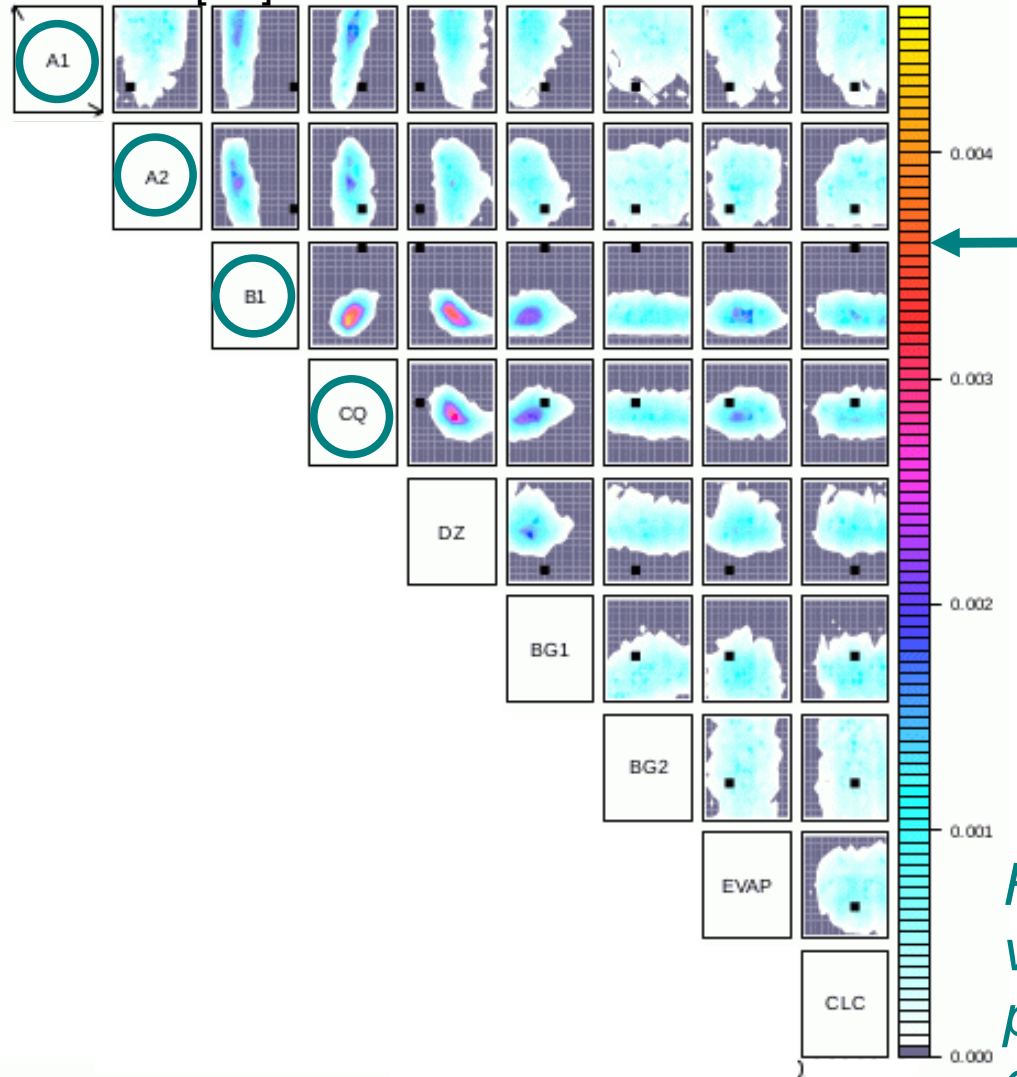
$$\text{NROY}_f^1 = \{\lambda \mid I_f(\lambda) < T\}$$

Fraction of the Not Ruled Out Yet (NROY) points when varying other parameters

LMDZ  
 Metrics :  $\int \theta(z) dz$   $\bar{q} v = \int qv(z) dz$   $z_{cld,ave} = \frac{\int cf(z) z dz}{\int cf(z) dz}$   $z_{cld,max} = z_{telque max}(cf)$   $cld_{max} = \max(cf(z))$   
 9 Parameters : Mass-flux scheme+ Cloud scheme +autoconversion+ reevaporation of rain

# Application de l'outil

NROY space after 30 Waves [1D]



$$I_f(\tilde{\lambda}) = \frac{|r_f - \mathbf{E}[f(\tilde{\lambda})]|}{\sqrt{\sigma_{r,f}^2 + \sigma_{d,f}^2 + \sigma_f(\tilde{\lambda})^2}}$$

$$\text{NROY}_f^1 = \{\lambda \mid I_f(\lambda) < T\}$$

Fraction of the Not Ruled Out Yet (NROY) points when varying other parameters

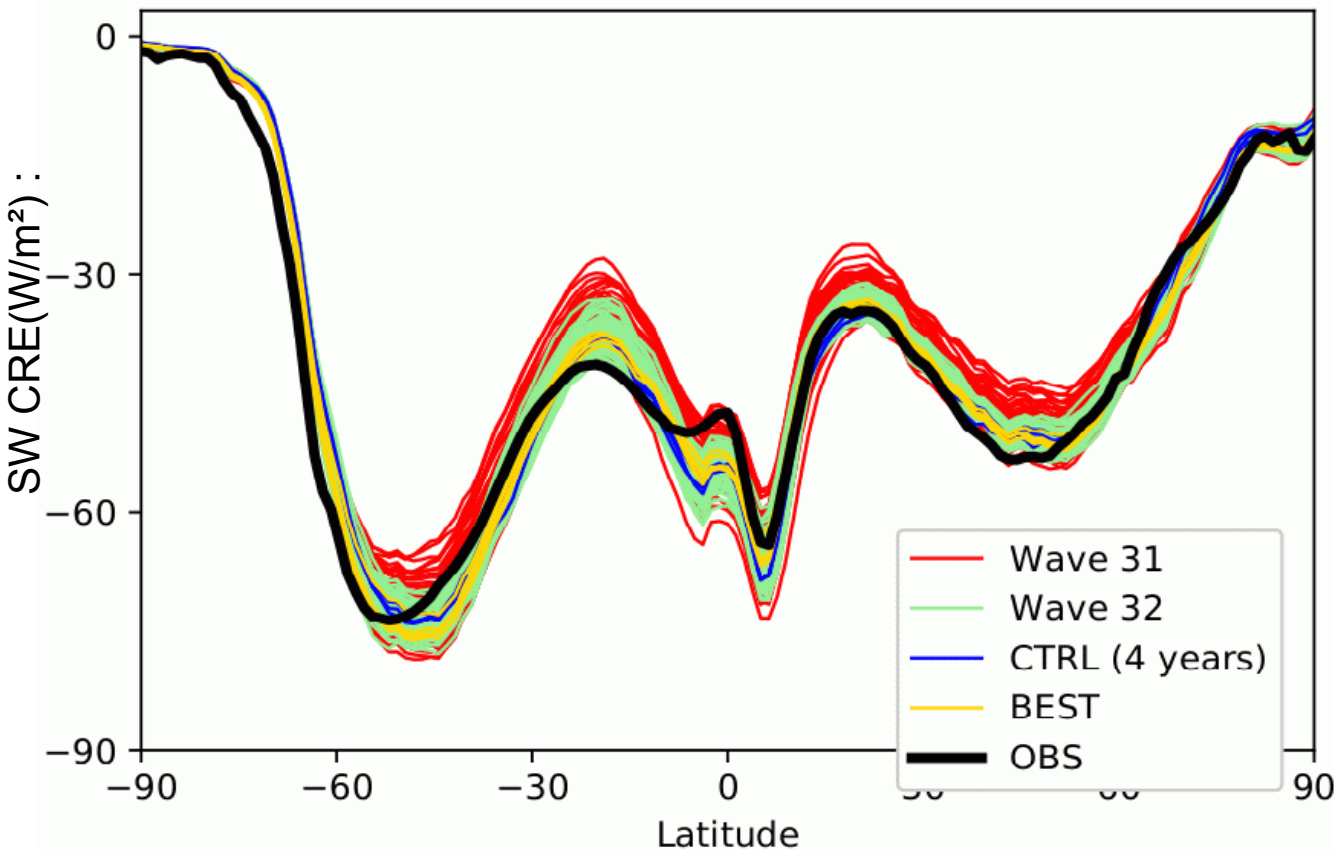
*Fournit des gammes de valeur de paramètres pour la calibration finale en 3D*

LMDZ  
 Metrics :  $\int \theta(z) dz$   $\bar{q} v = \int qv(z) dz$   $z_{cld,ave} = \frac{\int cf(z) z dz}{\int cf(z) dz}$   $z_{cld,max} = z_{telquemax}(cf)$   $cld_{max} = \max(cf(z))$   
 9 Parameters : Mass-flux scheme+ Cloud scheme +autoconversion+ reevaporation of rain



# De la calibration 1D à la calibration 3D

Zonal mean



Après 30 vagues 1D:  
combinaison de métriques 1D et 3D

Métriques radiatives 3D:  
Flux montant SW/LW TOA global ou sur  
Des régions particulières  
[9 paramètres]

- Déjà un bon comportement 3D juste après la calibration 1D
- Encore une réduction de l'écart aux observations lors de la calibration 3D

LMDZ  
IHOP/ARMCU/RICO/SANDU

Metrics :  $\theta(z)$ ,  $\bar{q}v = \int qv(z) dz$ ,  $z_{cld,ave} = \frac{\int cf(z) dz}{\int cf(z) dz}$ ,  $z_{cld,max} = z_{telquemax}(cf)$ ,  $cld_{max} = \max(cf(z))$

9 Parameters : Mass-flux scheme + Cloud scheme + autoconversion + reevaporation of rain  
+ 3D GCM tuning with radiative metrics

*Hourdin et al, 2021*

# Séparer défauts de calibration et erreurs structurelles du modèle

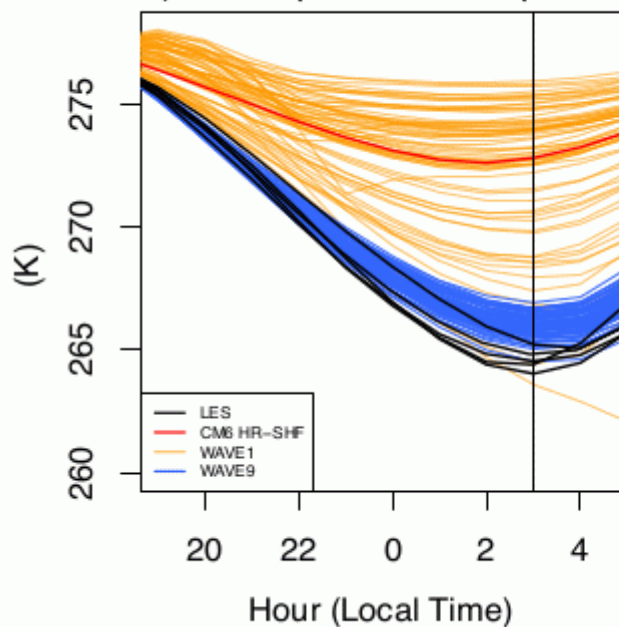
ARPEGE-Climat (Roehrig et al 2020) – SCM-HR-SHF [Dz=2m ->400m]  
 GABLS4 [seules les paramétrisations de turbulence et surface activées]  
 Métriques:  $\theta_{2m}$   $\theta_{8m}$   $ws_{max}$   $ws_{55m}$   
 7 Paramètres :  $C_m$ ,  $C_e$ ,  $L_{min}$ ,  $\alpha_{eps}$ ,  $\alpha_T$ ,  $Kozmin$ ,  $Kozmax$

$$K_\psi = \alpha_\psi \mathbf{CML}_m \sqrt{\bar{e}} \phi_\psi \quad L_m = \max [L_m^{BL89}, \min(\mathbf{LMIN}, \kappa z)]$$

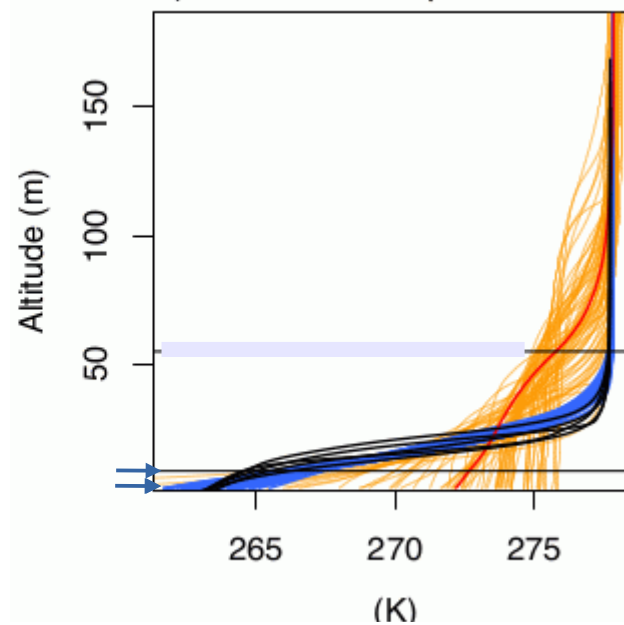
$$L_\epsilon = \mathbf{CEL}_m$$

LES – GABLS4  
 ARPEGE-Climat-CM6  
 Wave 1  
 Wave 9

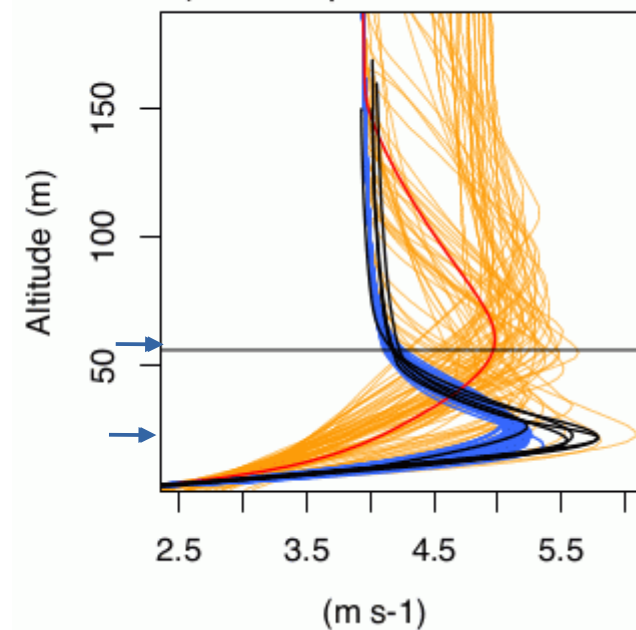
a) 8.5-m potential temperature ,



b) Potential temperature 0300



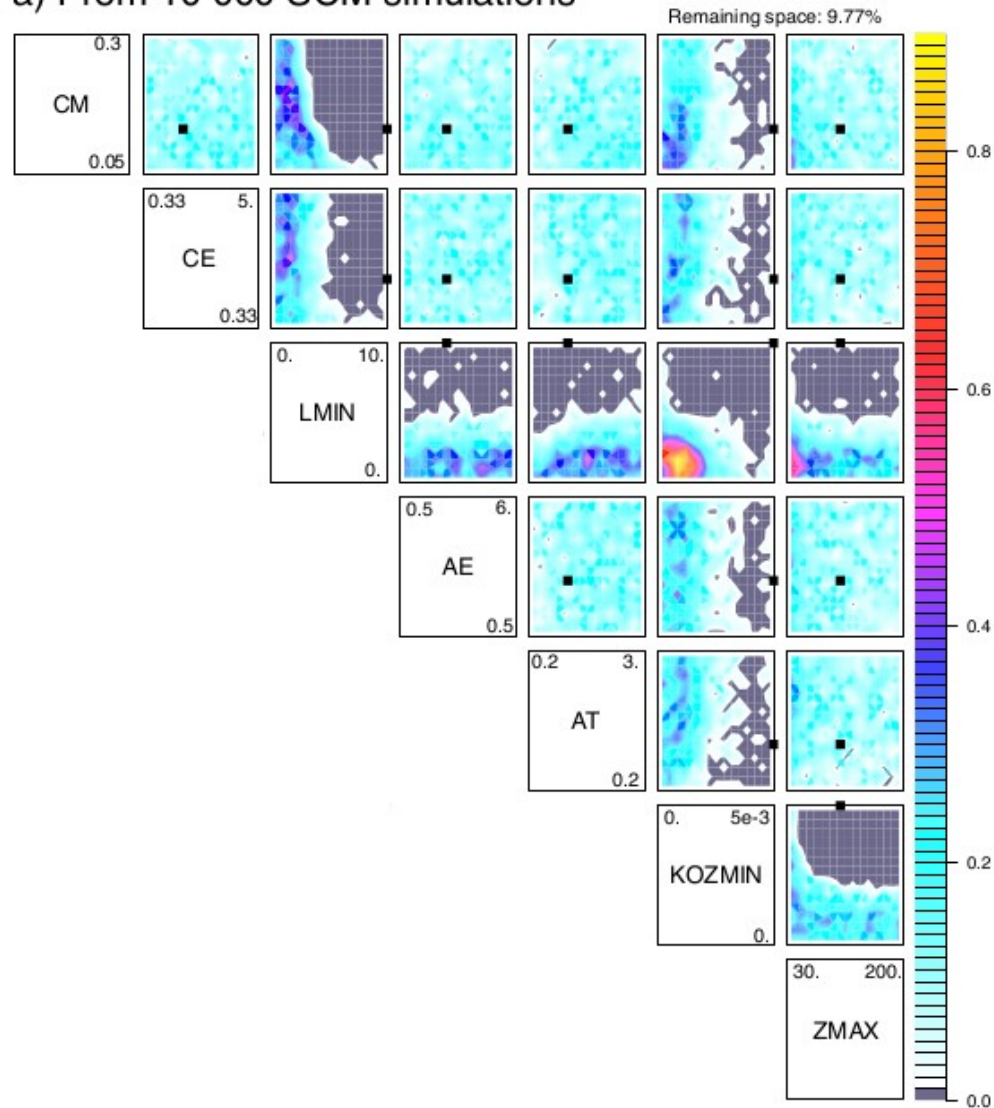
e) Wind speed 0100 LT



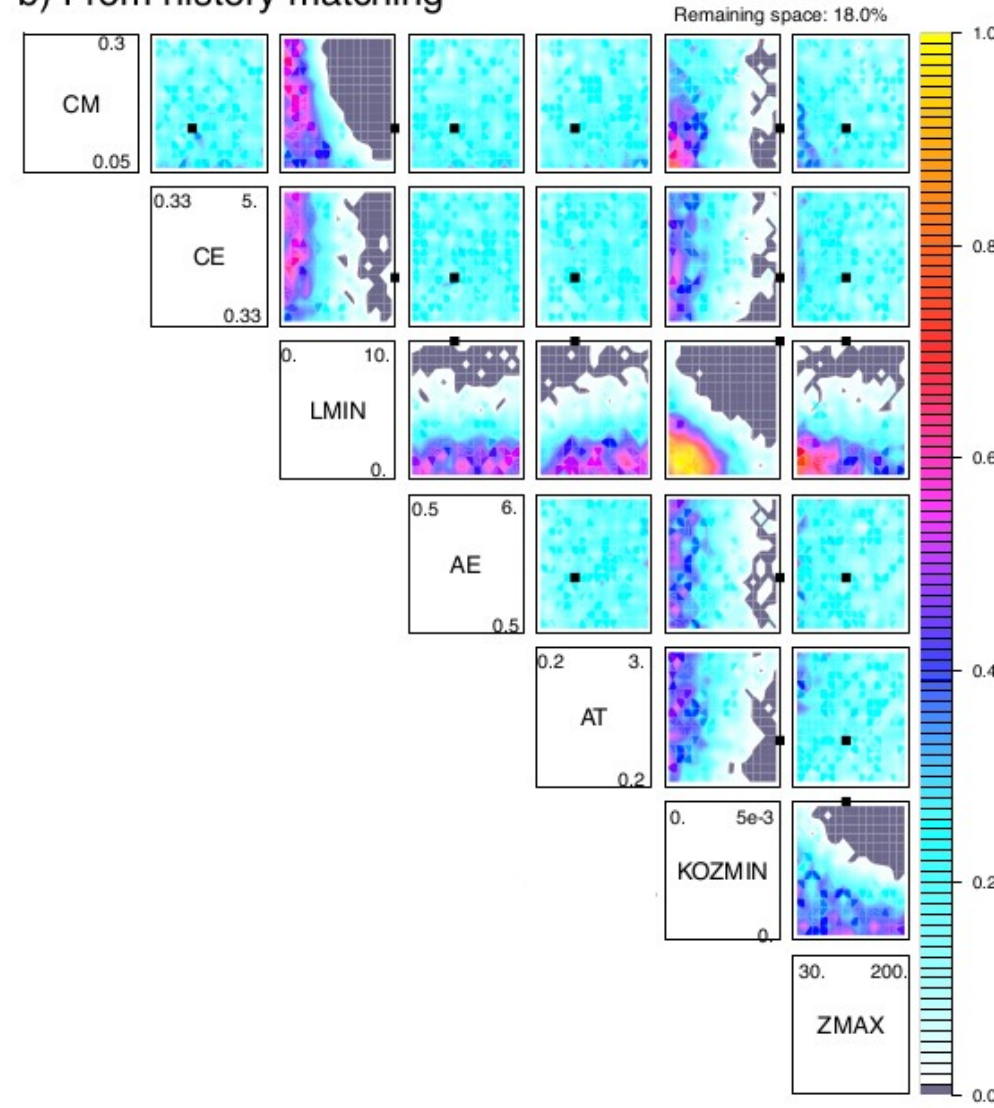
- Seules 4 métriques instantanées permettent de contraindre le comportement du modèle à représenter la couche limite stable la nuit

# Verification de la capacité de l'émulateur

a) From 10 000 SCM simulations



b) From history matching

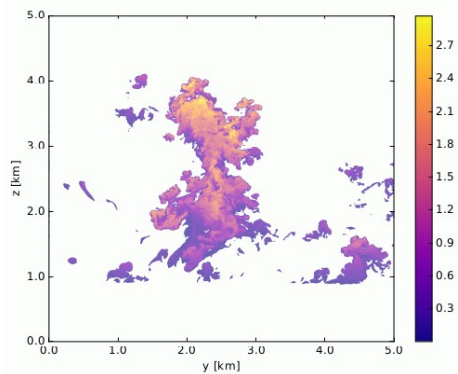


- cout faible des simulations 1D => réalisations de 10000 simulations
- résultats très cohérents

# Calibration d'une paramétrisation

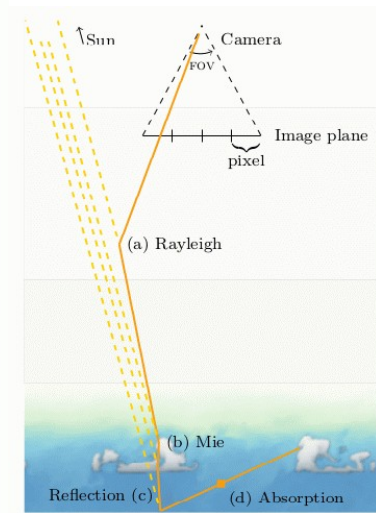
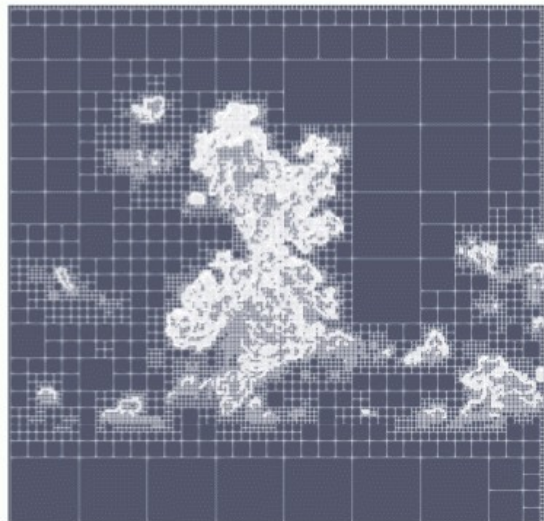
- Représentation de la géométrie des nuages dans la paramétrisation du rayonnement (ecRad)
- Calcul de références radiatives

a) Liquid water mixing ratio [g/kg]



Calcul radiatifs 3D Monte-Carlo sur des champs 3D de LES grâce à un suivi de chemin des photons (accéléré grâce à la combinaison de l'introduction de réflecteurs fictifs pour rendre le milieu homogène et de grille hiérarchique)

b) Hierarchical grid



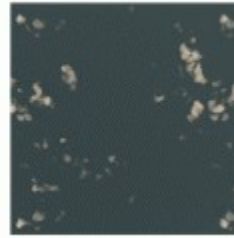
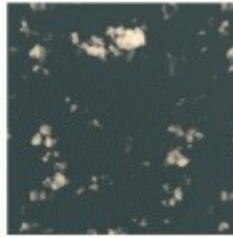
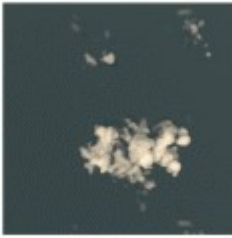
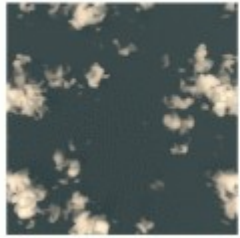
# Calibration d'une paramétrisation

ARMCu 08

ARMCu 12

BOMEX 05

BOMEX 11

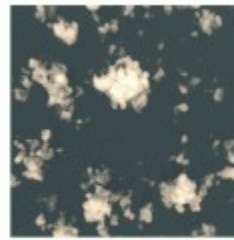
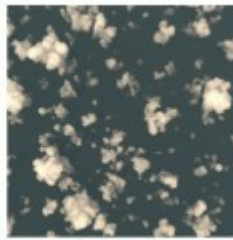
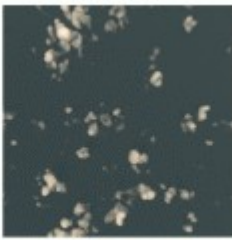
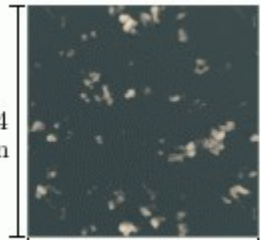


RICO 05

RICO 07

SCMS 05

SCMS 06

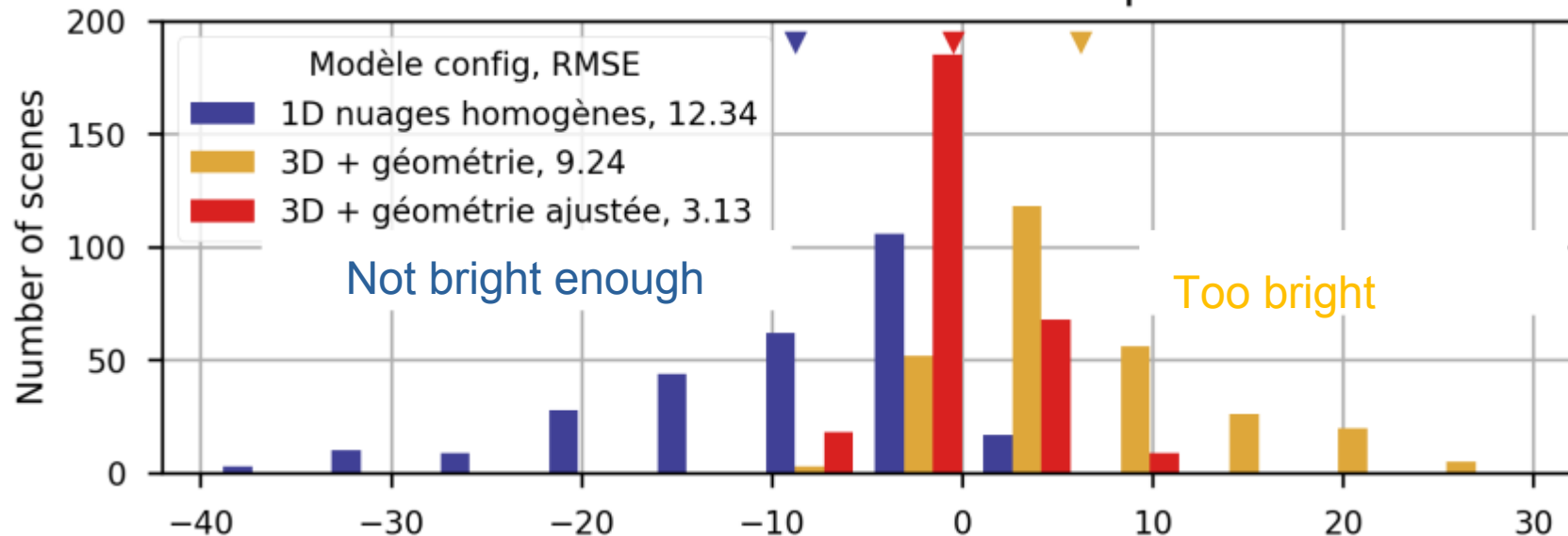


6.4 km

LES :

- Ensemble de scènes où calculs des effets radiatifs solaires

- Dérivation des profils 1D de nuages pour pouvoir appliquer la paramétrisation du rayonnement en mode offline



Differences in TOA reflected SW flux between parameterization and reference [W/m<sup>2</sup>]

# Calibration orientée processus

## Un nouvel outil pour accélérer le développement de modèle:

Méthodes d'Apprentissage Machine pour améliorer les paramétrisations  
Exploiter la comparaison LES/1D multi-cas et multi-métriques  
Prise en compte des incertitudes  
Outil disponible pour la communauté

## Peut servir à:

Analyse de sensibilité aux différents paramètres (incertitude paramétrique, Identifier paramètre limitant)  
Distinguer les limites du modèle versus des problèmes de calibration  
Fournir des gammes de valeur acceptables pour calibration finale du modèle 3D  
Peut-etre appliqué à des paramétrisations individuellement ou ensemble

## Vers la construction d'une stratégie de calibration bien définie:

Avec des bases physiques (emphasis sur les processus) et statistiques (UQ)  
Calibration orientée processus=> calibration globale

# Conclusions

## - Les paramétrisations:

Traduit notre compréhension du système – Forte composante physique  
Aller-retour permanent entre comportement modèle et compréhension des processus

## - Les simulations LES pour guider les paramétrisations :

Identifier ce qui semble clé à représenter dans les modèles  
Tester des formulations avant de les introduire dans les paramétrisations  
Construction d'une bibliothèque de cas [diversité des régimes, fichiers de forçages]  
Encore besoin de développement des modèles LES: représentation du rayonnement, de la microphysique, et de l'interaction avec la surface

## - Outil de calibration

Utiliser l'apprentissage machine pour améliorer les paramétrisations et non les remplacer  
Concilier les approches Apprentissage machine et approches plus traditionnelles  
Permet d'attaquer de front calibration et développement de modèles  
Actuellement, étude des possibles applications pour prévisions d'ensemble

## - Plus généralement :

Quels liens entre le GDR Théorie et Climat et le GDR DEPHY ?