



Quelques apports et limites des flux turbulents verticaux de Leonard dans AROME à différentes échelles de convection

L. Lutun¹, D. Ricard¹, F. Voitus²

¹CNRM/GMME/PHY-NH

²CNRM/GMAP/ALGO

19 Mars 2026

Plan de la présentation

- 1 Motivations et principe de la paramétrisation
- 2 Implémentation
- 3 Contextes d'action du flux de flottabilité de Leonard
 - Nuages de convection profonde
 - Hétérogénéités transitoires dans la couche limite
 - Hétérogénéité de meso-échelle et zone grise de la convection
 - Environnement montagneux
- 4 Métriques d'évaluation générale
- 5 Conclusion et perspectives

Motivations : biais en convection profonde

- Biais de modèle kilométrique en convection profonde en contexte de faible dynamique synoptique :
 - Sous-estimation systématique des enclumes nuageuses
 - Probable surestimation des vitesses verticales maximales résolues (Varble et al 2014).

AROME :

- Surestimation des déclenchements de convection profonde précipitante (de petite taille, en environnement peu dynamique)
- Fronts de rafales trop puissants en contexte de couche limite sèche

Une sous-estimation de la turbulence paramétrisée peut favoriser certains de ces biais (Machado et al. 2015). Verrelle et al. 2017 (entre autres) confirme que la formulation en K-gradient 1D est inapte à bien représenter la turbulence non-local dans la convection profonde.

Motivation : paramétrisation actuelle et limites

Equation d'évolution de l'énergie cinétique turbulente (TKE) (Cuxart et al. 2000)

$$\frac{De}{Dt} = \underbrace{-\sum_{j=1}^3 \left(\overline{w'u'_j} \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial z} \right)}_{\text{prod. dynamique}} + \underbrace{\frac{g}{\theta_{v,ref}} \overline{w'\theta'_v}}_{\text{prod. thermique}} + \text{Diffusion} - \text{Dissipation}$$

- Verrelle (2015,2017) a identifié une sous-estimation importante de TKE d'origine thermique dans les nuages de convection profonde (MESO-NH km - hm vs LES): cause principale de sous-estimation de TKE.
- En accord avec Moeng 2010, ce biais est attribué à une mauvaise représentation de la structure et des amplitudes des flux de chaleur (structures à "contre-gradient") et d'humidité.

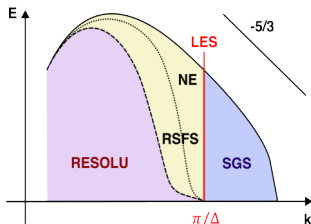
Contribution de transport des échelles peu / non résolues

$$\tau_{i,\psi} = \underbrace{\left[\widetilde{\psi \tilde{u}_i} - \tilde{u}_i \tilde{\psi} \right]}_{\text{L term : subfilters scales}} + \underbrace{\left[\widetilde{\tilde{u}_i \psi'} + \widetilde{u'_i \tilde{\psi}} - \tilde{u}_i \tilde{\psi}' - \tilde{u}'_i \tilde{\psi} \right]}_{\text{C term : scales interaction}} + \underbrace{\left[\widetilde{u'_i \psi'} - \tilde{u}'_i \tilde{\psi}' \right]}_{\text{R term : subgrid scales}}$$

- Nouvelle formule des flux scalaires verticaux :

$$\overline{w' \psi'} = \underbrace{-K_\psi \frac{\partial \psi}{\partial z}}_{\text{Kgradient}} + \underbrace{\frac{K_L}{12} \left(\sum_{i=1,2} \frac{\partial w}{\partial x_i} \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \right)}_{\text{Leonard}}$$

- Expression explicite de la corrélation des variables dans une colonne d'atmosphère, en comparaison de l'environnement latéral.
- Hypothèse d'analogie de comportement avec petites échelles résolues (RSFS) plutôt qu'avec l'échelle moléculaire.



Spectre d'énergie théorique dans l'atmosphère (adapté de Chow et al 2005)

Modification du schéma de turbulence : quels objectifs ?

- **L'objectif premier c'est de bien représenter les sources que sont les $\text{div}(\text{flux})$, associées à chaque flux turbulent**

→ Le terme de Leonard vertical doit améliorer le partitionnement résolu / paramétrisé du transport vertical de chaleur et d'humidité dans la convection profonde.

- **La TKE est une métrique d'évaluation du schéma. Lorsqu'elle est prognostique (CBR), elle peut devenir un objectif à part entière pour qu'un flux (producteur de TKE) en améliore un autre.**

→ Le terme de Leonard vertical doit améliorer le flux de flottabilité, donc la production thermique de TKE, pour éventuellement améliorer l'activité des flux en K-gradient dans la convection profonde.

Contraintes d'implémentation

Règle de la chaîne en coordonnée suivant le relief

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_z = \underbrace{\left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_\eta}_{\text{Horizontal selon la coordonnée } \eta} - \underbrace{\left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_\eta}_{\text{Terme de correction orographique}} \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

- 1 Contrainte assurant le caractère "bien posé" du terme de diffusion verticale (diffusion verticale traitée implicitement en temps)

$$\frac{K_L}{12} \sum_{i=1,2} \left(\Delta_{x_i}^2 \left. \frac{\partial w}{\partial x_i} \right|_z \left. \frac{\partial z}{\partial x_i} \right|_\eta \right) + K_\psi \geq 0$$

- 2 Contrainte de stabilité numérique (similaire à un résultat de Hanley 2019) :

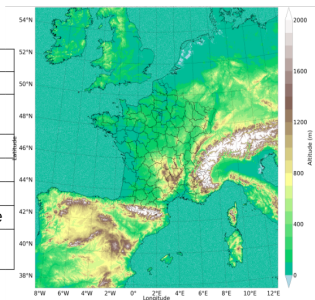
$$K_{L_{MAX}} \approx \frac{6}{\Delta t} \frac{\Delta z}{|\Delta(w)_x| + \Delta(w)_y}$$

- 3 Limiteur pour assurer le caractère défini positif de l'opérateur appliqué à l'humidité (la source "brute" de Leonard peut créer des valeurs d'humidité localement négatives).

Configuration modèle et cas d'étude:

Configuration AROME - France

Dt	50s
Dx	1,3km
Dz	90 niveaux, 5m au sol à 400m vers 10 000m
Microphysique	ICE3 (1 moment)
Turbulence	CBR (1D) 2000
Convection peu prof.	Pergaud et al. 2009
Autre	Condensation sous-maille
Dynamique	Semi-implicite, semi-lagrangien, spectrale



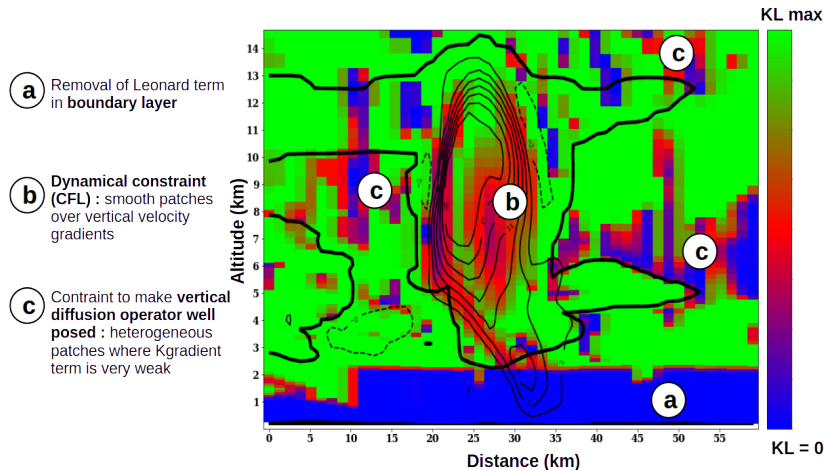
Domaine AROME-France

Cas d'étude

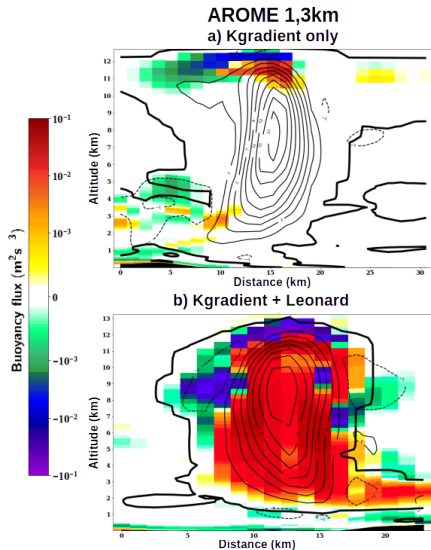
- Convection profonde : 2023/06/12 (marais barométrique peu dynamique), 2025/06/25 (orages organisés / thalweg dynamique)
- Couche limite et zone grise de convection : 2025/07/12 (goutte froide sous blocage anticyclonique)
- Evaluation plus longue : 2025/06/13 - 2025/07/20 (prolongation à venir)

Action dans les nuages de convection profonde

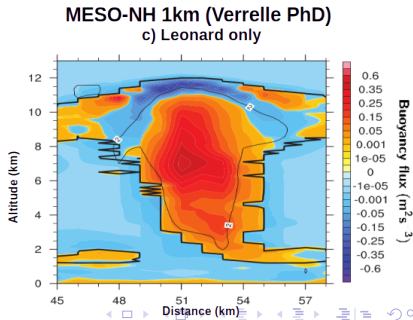
K_L (dimensionless, colorshades), vertical velocity (m/s, thin lines),
cloud ($r_c + r_i = 10^{-3} \text{g/kg}$, thick line)



Changement des structures de turbulence dans les nuages de convection profonde



- Kgradient flux weak and localised at updraft top and bottom (a)
- Benefits from Leonard strong flux structure in MESO-NH (c) are clearly repeated in AROME (b)



Amplification du transport turbulent et rétroaction

- TKE nettement amplifiée en conséquence de la production thermique
- Rétroaction de cette TKE additionnelle bénéfique ? Pas très clair dans la paramétrisation 1D

Caption :

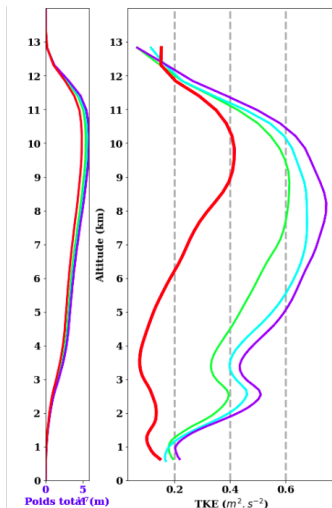
█ Kgradient + Leonard, KL = 2

█ Kgradient + Leonard, KL = 4

█ Kgradient + Leonard, KL = 6

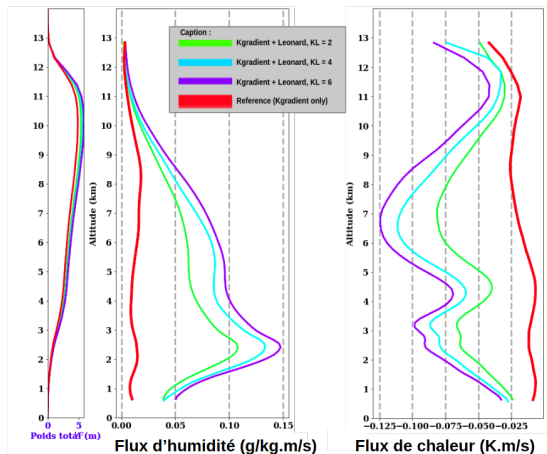
█ Reference (Kgradient only)

TKE (m^2/s^2) moyenne dans les nuages convectifs profonds



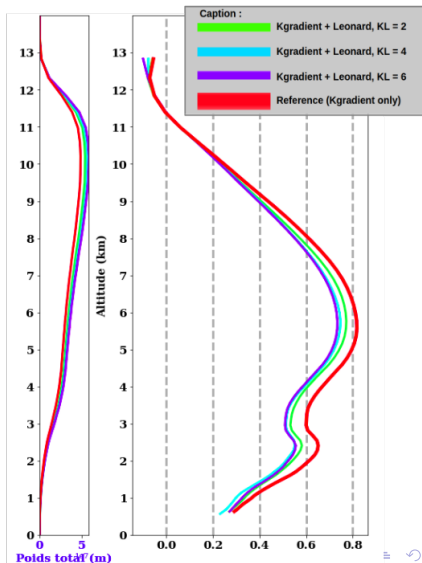
Flux de chaleur et flux d'humidité

- Flux nettement amplifiés
- Structures fluctuantes selon les situations : dépendance à la répartition dans les différentes catégories d'hydrométéores
- Il faut bien comprendre la sensibilité de la structure du flux et les mécanismes qui la définissent.



Rétroaction générale sur la convection

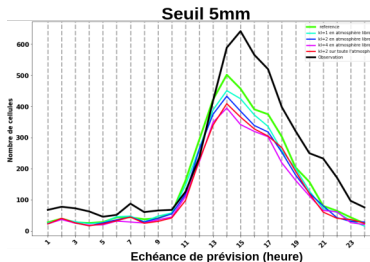
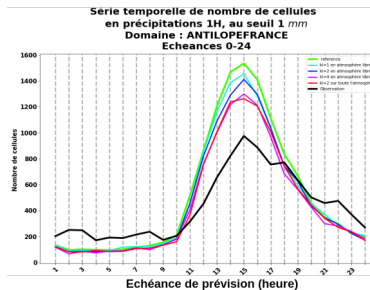
- Effet dominant d'inhibition des ascendances convectives résolues
- Impact sur la structure interne du nuage difficile à appréhender :
 - tendance turbulente
 - correction via sources diabatiques
 - réponse en vitesse verticale résolue



Impacts statistiques sur la convection précipitante

Sélection de cas de convection pure, dans un environnement peu dynamique : 15 jours

- Biais de surestimation des cellules ne ressort qu'à 1mm
- Leonard contribue clairement à réduire le nombre de cellules convective (petites en particulier)
- Légère augmentation des précipitations via Leonard sur ces cas (non montré ici)

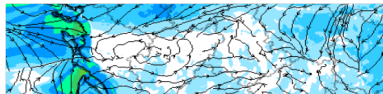


Cas test d'étude de Leonard dans la couche limite

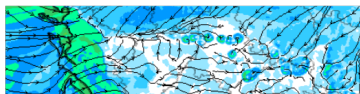
14TU

(Modele) Vent moyen (~15m du sol)

16TU

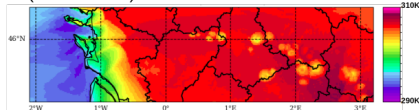
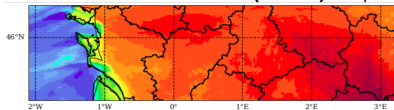


Color : meteociel

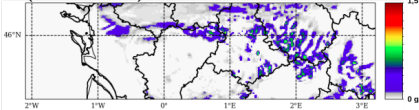
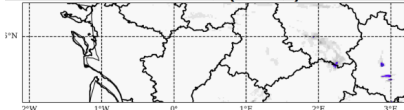


Color : meteociel

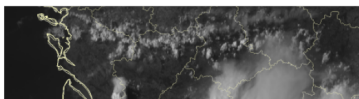
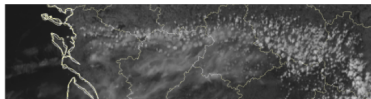
(Modele) Température potentielle (~15m du sol)



(Modele) Contenu en eau nuageuse (3000m du sol)



(Obs) MTG (Visible 10,6um)



Hétérogénéités transitoires de couche limite

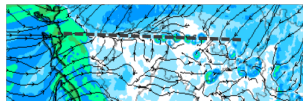
- Phase purement subsidente d'un courant de densité
 - Changements clairs de structure de flux turbulent (analogie ascendance convective profonde / subsidence courant de densité).
 - Impact sur les caractéristiques du courant de densité arrivant au sol mal appréhendées.

- Propagation horizontale d'une hétérogénéité (front de rafale, brise de mer)
 - Excitation d'une ascendance résolue inévitable : source 3D
 - Leonard actif (en particulier augmentation du transport d'humidité) mais très transitoire et pas strictement au sol.
 - Quelle turbulence sous-maille dans une telle structure ? Manque de référence

Convergence de méso-échelle et convection peu profonde

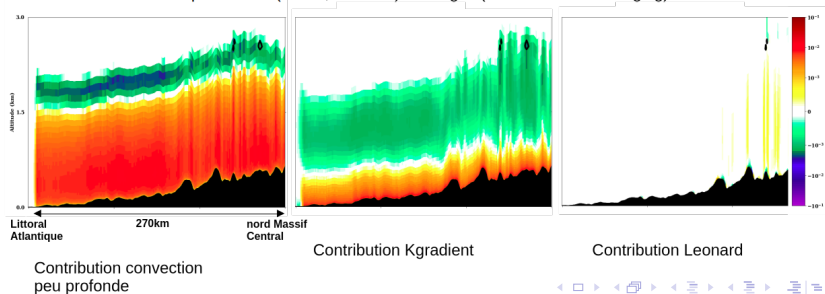
Activité très marginale de Leonard dans la couche limite convective

16TU
(Modele) Vent moyen (~15m)



11TU

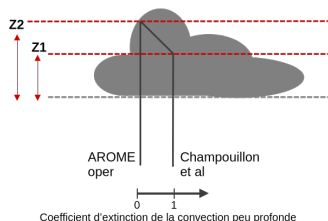
Production thermique de TKE (m^2/s^3 , couleurs) et nuages (contour $rc+ri = 1E-3$ g/kg)



Zone grise de la convection

AROME oper : $Z1=4000\text{m}$,
 $Z2=3000\text{m}$. C'est très haut !

→ Extinction opérationnelle non viable pour abaisser $Z1$ et $Z2$: on éteint la paramétrisation ... et rien ne se passe.

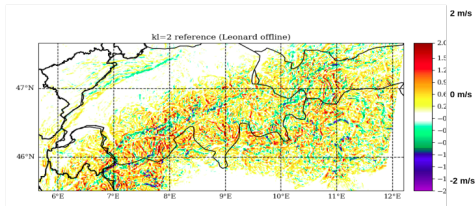


Test de sensibilité extinction Champouillon $Z1 = 500\text{m}$, $Z2 = 0\text{m}$

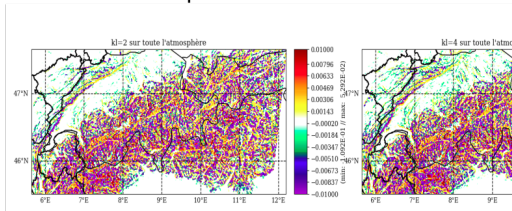
- Nuages peu profonds plus fins (pas de relais résolu pour compenser la baisse d'activité de la paramétrisation)
- Ajout du terme de Leonard : très peu d'effet avant la transition (soudaine) vers la convection résolue. Action à postériori de la transition pour amplifier les flux dans la convection nuageuse (cf convection profonde précipitante).

Environnement montagneux

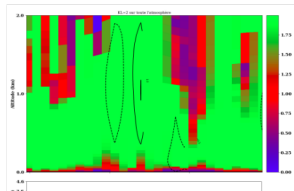
Vitesses verticales à ~15m du sol



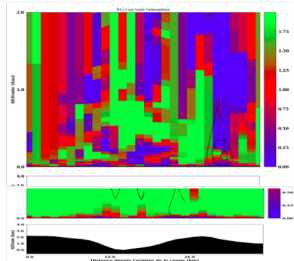
Production thermique de TKE de Leonard à ~15m du sol



- Fortes activité de Leonard au voisinage de la surface (même si KL très contraint !). Structure un peu « bruitée ».
- Compensation via flux de masse paramétrisé et Kgradient : développement d'une activité très hétérogène en surface



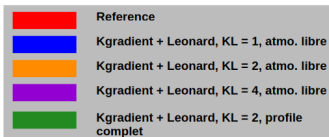
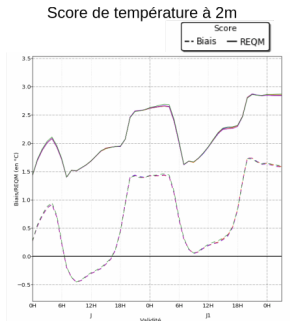
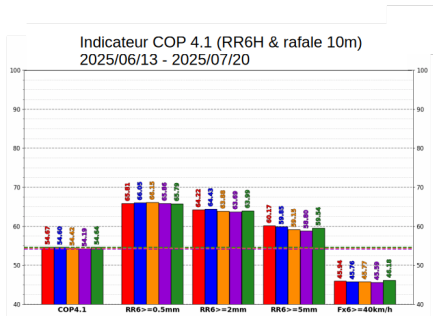
13TU



23TU

Coefficient KL effectif (couleurs) et vitesse verticale (m/s, contours)

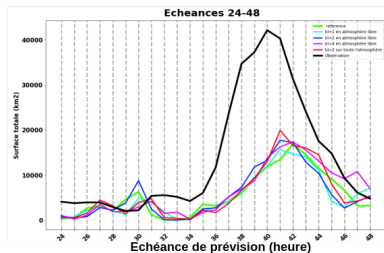
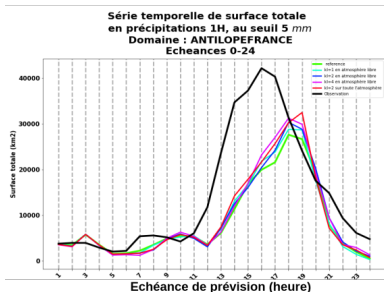
Métriques d'évaluation générale



- Effet marginal de Leonard (via convection précipitante)
- Dégradation température en 2nde partie de nuit si activé jusqu'au sol (effet des zones de relief)
- Biais terrible de surchauffe nocturne (indépendant de Leonard).
- Dérive avec amplification du biais à l'échelle d'un cycle diurne.

Biais et dérive d'AROME : impact sur la convection

- Définition des jours avec convection profonde dans un environnement peu dynamique : comparaison des prévisions de la veille vs jour j pour ces jours.
- La convection est clairement inhibée au 2e jour de prévision à cause de la dérive très rapide du modèle en situation estivale chaude.



- Convection profonde (précipitante)
 - Amplification du flux turbulent de flottabilité en cohérence avec les résultats dans MESO-NH. Sensibilité au contexte météorologique sur son partitionnement en flux de chaleur / flux d'humidité.
 - Processus de rétroaction sur la convection précipitante encore mal compris : besoin d'un cadre plus idéalisé ?
- Couche limite convective
 - Terme de Leonard peu complémentaire du schéma de convection peu profonde en générale (peu de "double comptage" du transport paramétrisé).
 - Hétérogénéités transitoires de couche limite : Activité de Leonard mais conséquences mal appréhendées, manque de référence pour caractériser le transport sous-maille dans ces structures.
- Evaluation générale
 - Impact du terme de Leonard faible sur les métriques générales à grande échelle. Dégradation des températures nocturnes en montagne si activé jusqu'au sol.

- Sensibilité de la paramétrisation de turbulence vis à vis de l'ajustement à saturation (et du schéma de condensation sous-maille)
- Sensibilité de la paramétrisation vis à vis de la diffusion numérique
- Simulations hectométriques de convection avec le flux de flottabilité de Leonard
- Travail sur l'implémentation des flux turbulent horizontaux (à partir du schéma Kgradient Cuxart, Bougeault, Redelsperger)

APPENDIX

More details about numerical dynamical constraint

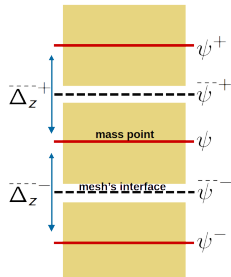
$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_z = \underbrace{\left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_\eta}_{\text{Horizontal according to } \eta \text{ coordinate}} - \underbrace{\left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_\eta \frac{\partial \psi}{\partial z}}_{\text{Orographic term}}$$

Dynamical stability constraint (similar to Hanley 2019 result) :

$$\text{MAX}(\bar{K}_L^+, \bar{K}_L^-) \leq \frac{6\tilde{\rho}}{\Delta t} \frac{1}{|\langle W_x \rangle| + |\langle W_y \rangle|}$$

$$\text{with } \langle W_{x_i} \rangle = \frac{\tilde{\rho}^+}{\Delta z^+} \Delta_{x_i}(w)^+ + \frac{\tilde{\rho}^-}{\Delta z^-} \Delta_{x_i}(w)^-$$

$$\text{and } \tilde{\rho} = \rho \Delta z$$



Notations from vertical discretization

Moisture positiveness issue

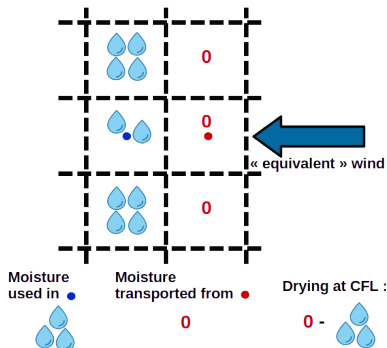
Leonard explicit advective trend :

$$r_{np}(t^+) = r_{np}(t^0) - \Delta t u \frac{\partial \widetilde{r}_{np}}{\partial x}(t^0)$$

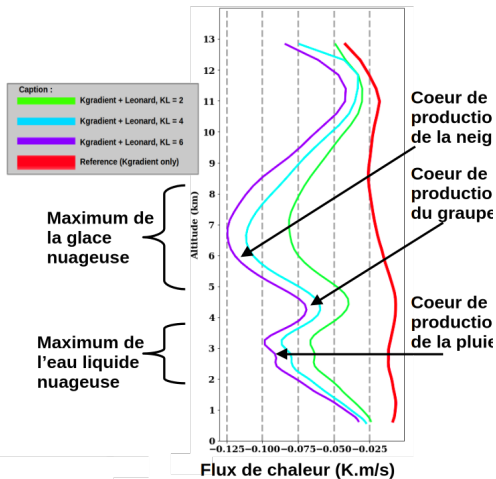
$$\text{whith } \widetilde{r}_{np} = \frac{r_{np}^+ + 2r_{np} + r_{np}^-}{4}$$

Same issue exists with classic advection source :

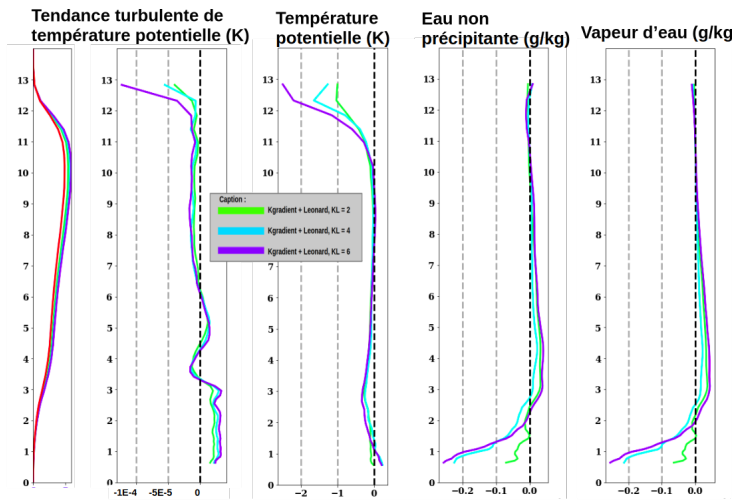
- With 1 order upwing gradients, CFL insures both numerical stability and positiveness.
- Yet, using 2nd order upwind gradients :
 $\nabla_x r_{np} = \frac{3r_{np_i} - 4r_{np_{i-1}} + r_{np_{i-2}}}{2\Delta x}$ CFL condition continues to insure numerical stability, but not positiveness anymore !



Convection profonde nuageuse : enjeux dans la structuration des flux turbulents

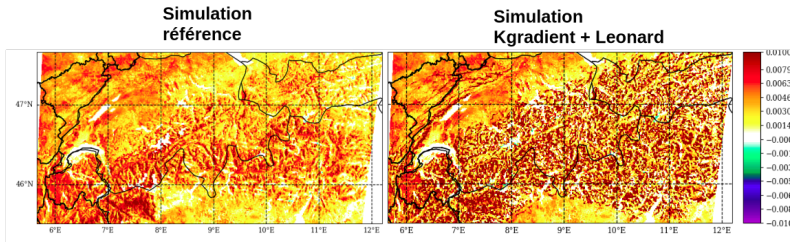


Ecart des profils moyens dans la convection profonde

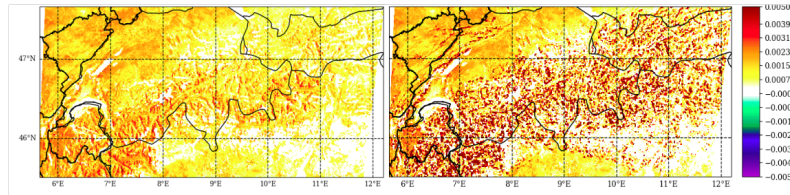


Compensation hétérogène de Leonard en surface

Contribution
du Kgradient



Contribution
de la convection
de profonde



Production thermique de TKE (m2/s3) à ~15m du sol