

# Raffinement d'un modèle mésoéchelle pour la simulation aux grandes échelles

Nicolas Gasset, DRQA/AQRD, Environnement Canada

Thèse réalisé sous la direction de  
Christian Masson et Robert Benoit  
École de technologie supérieure

22 Mai 2015

# Table des matières

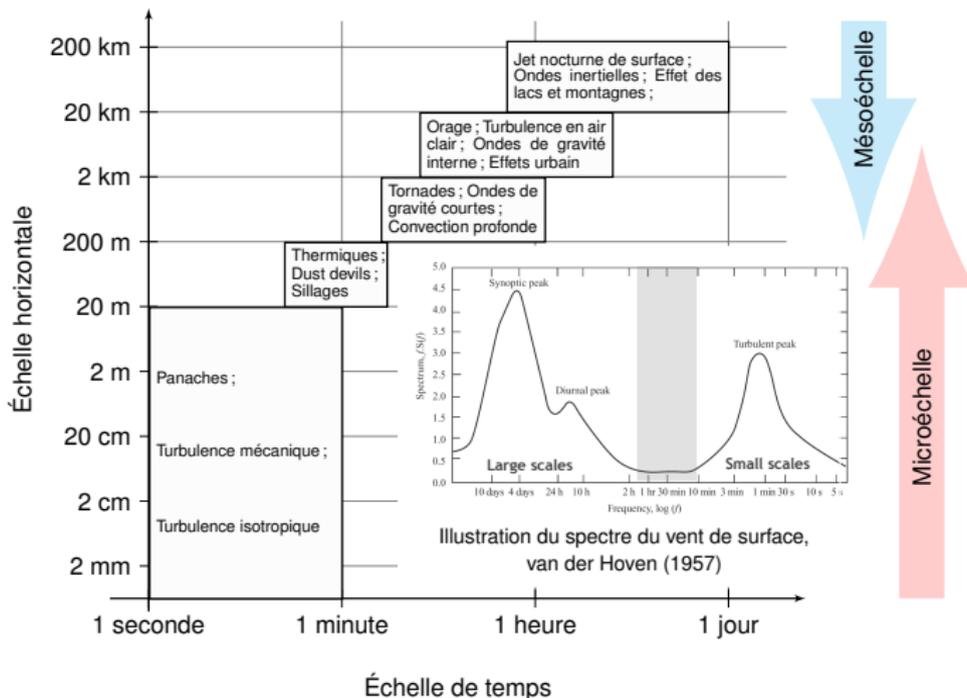
- Contexte et objectifs
- Méthodologie
- Évaluation et validation
- Conclusion



Ferme d'éoliennes, Murdochville, QC

# Contexte de l'étude

## Échelles temporelles et spatiales des phénomènes atmosphériques (Stull, 1988)



# Objectifs

Identifier, implémenter et évaluer une approche capable de modéliser les écoulements de la couche limite atmosphérique (ABL) allant des microéchelles aux mésoéchelles

# Approches microéchelles et CFD

- Principalement dédiées à l'étude des propriétés moyennes de la couche de surface (SL)  $\sim 10\%$  du bas de la ABL
- Stationnaire et turbulence 3D
- Applications en ingénierie
- Domaines de plus en plus grands ( $L_x$ )
- $L_x > 10$  km possible mais ...

## Essentiel pour :

**Évaluation de la ressource locale,  
positionnement des éoliennes et  
configuration de ferme d'éoliennes**

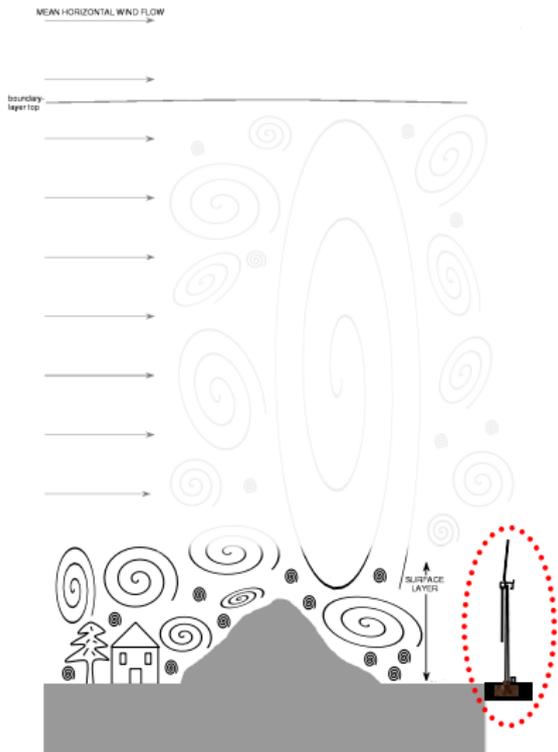


Illustration des processus prenant place au sein du SL

# Approches mésoéchelles

- Dédiées à la modélisation environnementale et à l'étude de phénomènes atmosphériques synoptiques et mésoéchelles évoluant dans le temps.
- Instationnaire, ABL et turbulence 1D
- Applications météorologiques
- Maillage de plus en plus fin ( $\Delta x$ )
- $\Delta x < 1$  km possible mais ...

Essentiel pour :

**Prévision du vent et évaluation de la ressource à grande échelle**

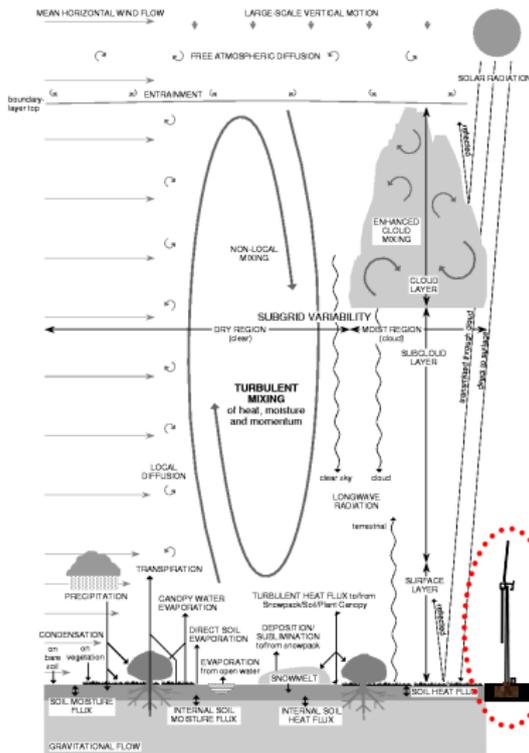
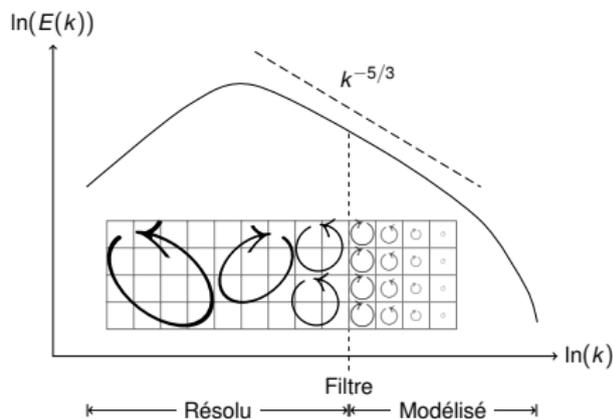


Illustration des processus prenant place au sein de ABL  
(source : blg.coas.oregonstate.edu/)

# Simulation aux grandes échelles (LES)

## Résolution des grosses structures turbulentes et modélisation des plus petites, i.e. la sous-maille (SGS)

- Instationnaire et turbulence 3D
- Applications météorologiques et en ingénierie
- Filtre et modèles de sous-maille
- Exigeant en temps de calcul et en espace mémoire
- Application plus complexe



← Résolu → \* ← Modélisé →  
Schéma du spectre d'énergie cinétique

**Rejoint sous certains aspects la modélisation mésoéchelle**

# LES appliquée à l'ABL

## ABL : écoulement à haut Reynolds proche d'une paroi rugueuse

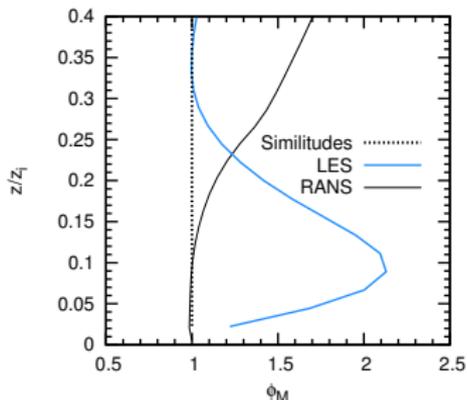
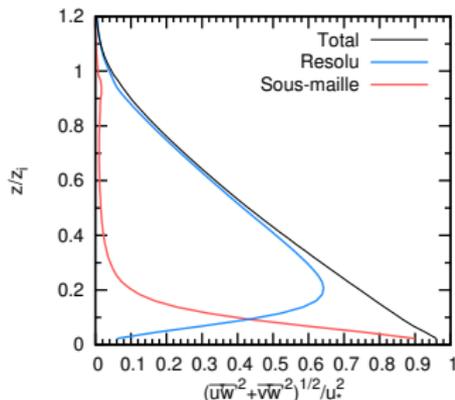


Illustration de résultats typiques de LES de l'ABL (Smagorinsky/Deardorff)

# Méthodologie

## **Modélisation couplée mésoéchelle/LES**

Bénéficier des aptitudes de modélisation environnementale et grandes échelles du modèle mésoéchelle, tout en restant bien adapté aux plus fines échelles grâce à un modèle SGS.

## **Implémenter et valider une approche de modélisation de la sous-maille (SGS) (et autres composantes requises) au sein d'un modèle mésoéchelle pour son utilisation en mode LES**

### **Défis :**

- Projet à cheval entre la météorologie et l'ingénierie
- Simulation aux grandes échelles - nouveau axe de recherche
- Valider un modèle mésoéchelle à microéchelle

# Fondement de l'approche

## Modèle mésoéchelle compressible communautaire (MC2)

- Prévision numérique du temps (NWP)
- Noyau dynamique (i.e. partie résolue)
  - Semi-Implicite Semi-Lagrangien (SISL)
  - Résolution des Équations d'Euler compressibles (Non-hydrostatique)
- Librairie physique (i.e. partie modélisée)
  - Rayonnement, condensation, stratification thermique, turbulence, ...
  - Commune aux autres modèles mésoéchelles d'Environnement Canada

Gratuit et libre (licence LGPL)

[collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn.comm](http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn.comm)

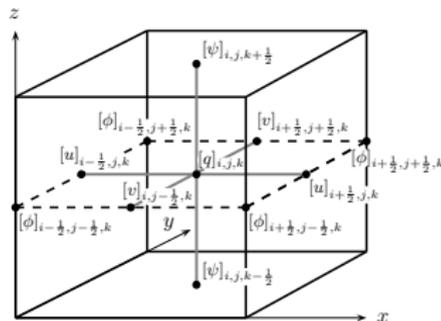
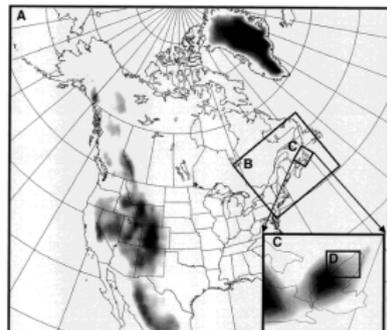
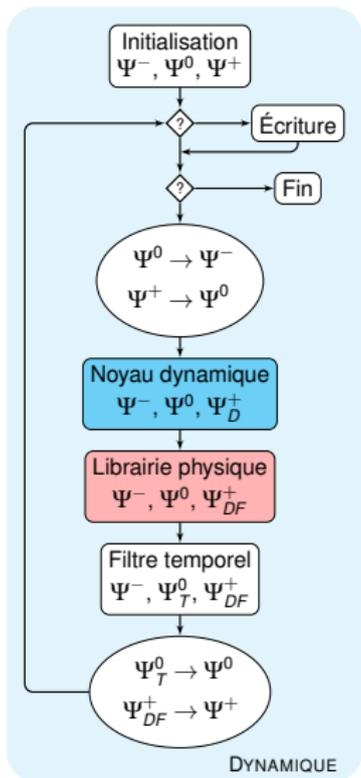


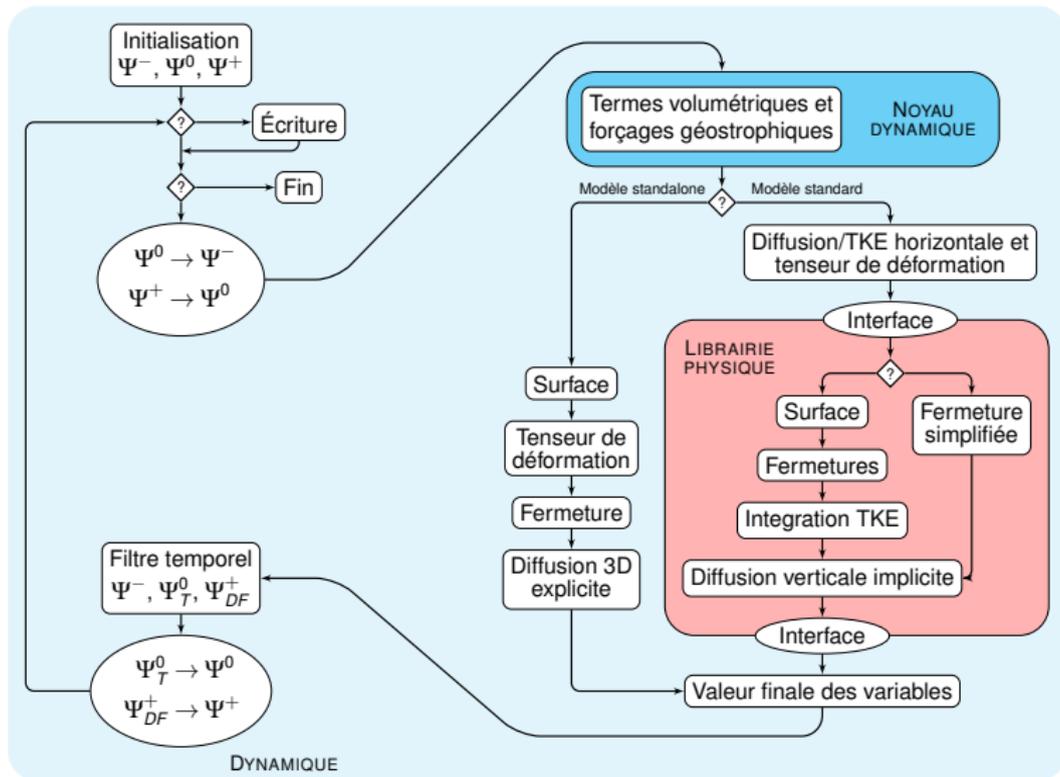
Illustration d'une cascade ( $\Delta x = 50$  km à 0.4 km), Benoit et al. (1997) (en haut) et élément de maillage (en bas)

# Adaptations et améliorations



- **Raffinement du modèle de turbulence existant**
  - Diffusion turbulente 3D
  - Équation 3D de la TKE
  - Termes volumétriques inclus dans le noyau dynamique
- **Nouvelle discrétisation de la librairie physique**
- **Nouveaux modèles de sous-maille**
- **Nouveau modèle de turbulence “standalone” explicite** (sans librairie physique)
- **Nouveaux modes opératoires**

# Adaptations et améliorations (suite)



# Évaluation et validation

## Défis

- MC2 à valider à microéchelle en mode LES
- Beaucoup de composantes de MC2 modifiées ou nouvelles

## Philosophie

- Reproduction de cas théoriques simples
- Complexité ajoutée pas à pas

## Objectifs

- Évaluer chaque composante (nouvelle et raffinée) de la méthode
- Désactiver un maximum de processus sauf ceux à valider

## Cas théoriques

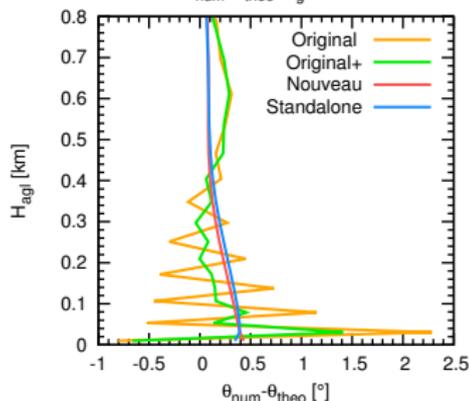
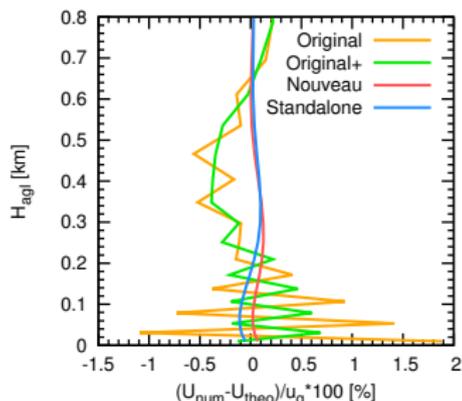
- Onde de montagnes : pas de librairie physique (pas de turbulence)
- Ekman : librairie physique simplifiée (RANS algébrique)
- Microéchelle : librairie physique complète (RANS ou LES)

# Cas Ekman : Berger et Grisogono (1998)

Forçages géostrophiques + périodicité avec  
bibliothèque physique simplifiée

- Original/Original+ : mode numérique
  - Erreur max. :  $\sim 3\%$  de  $u_g$
  - Cause : interpolation/extrapolation
  - Solution : discrétisation contiguë
- Nouveau/Standalone
  - Erreur max. :  $\sim 0.2\%$  de  $u_g$
  - Indépendant du maillage vertical
  - Résultats presque identiques

**Forçages géostrophiques, nouvelle  
bibliothèque physique et diffusion verticale  
de Nouveau/Standalone : valides en 1D**



# Cas microéchelle : Moeng et Sullivan (1994)

## Cas convectif et neutre (ABL complète)

- Forte inversion :  $8^{\circ}K$  en  $6\Delta z$
- Cas bien décrit et reproduit par plusieurs auteurs
- Modèles LES et SGS éprouvés

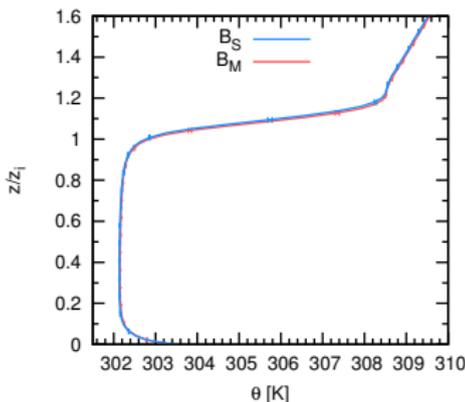
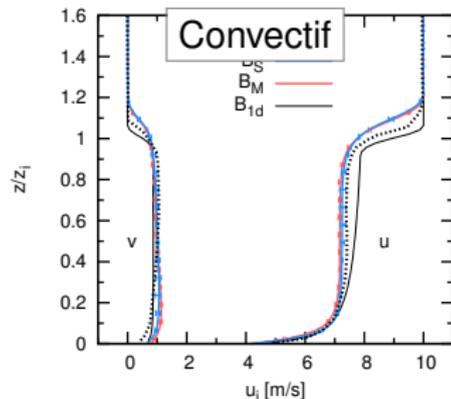
## Initialisation

- Profils initiaux :  $u_g, \theta$
- Perturbation aléatoire de vitesse
- Surface terrestre chauffante

## Conditions limites

- Surface homogène (similitude)
- Périodicité latérale
- Gradient nul et zone tampon au toit

## Librairie physique complète



# Cas microéchelle : Moeng et Sullivan (1994)

## Cas convectif et neutre (ABL complète)

- Forte inversion :  $8^\circ K$  en  $6\Delta z$
- Cas bien décrit et reproduit par plusieurs auteurs
- Modèles LES et SGS éprouvés

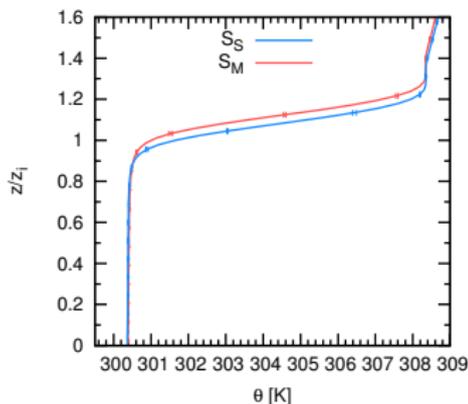
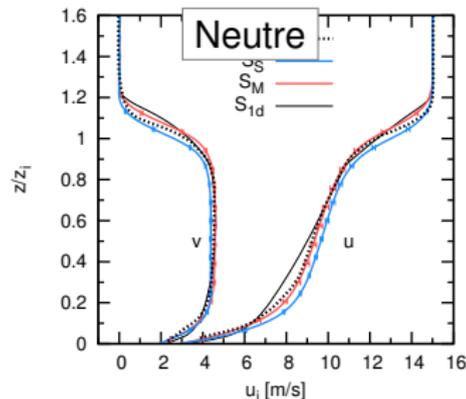
## Initialisation

- Profils initiaux :  $u_g, \theta$
- Perturbation aléatoire de vitesse
- Surface terrestre chauffante

## Conditions limites

- Surface homogène (similitude)
- Périodicité latérale
- Gradient nul et zone tampon au toit

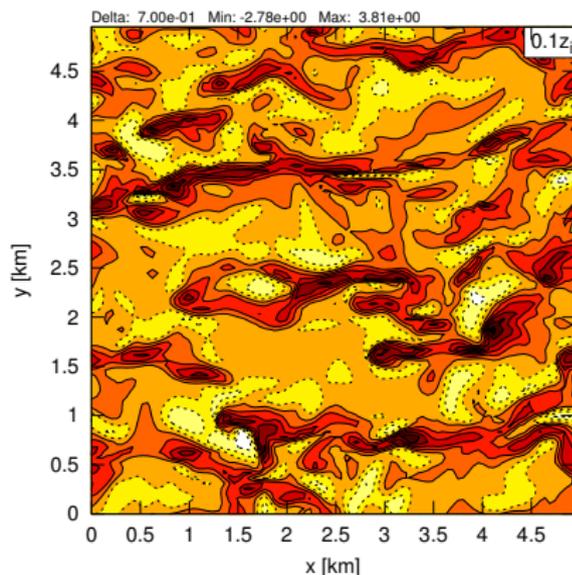
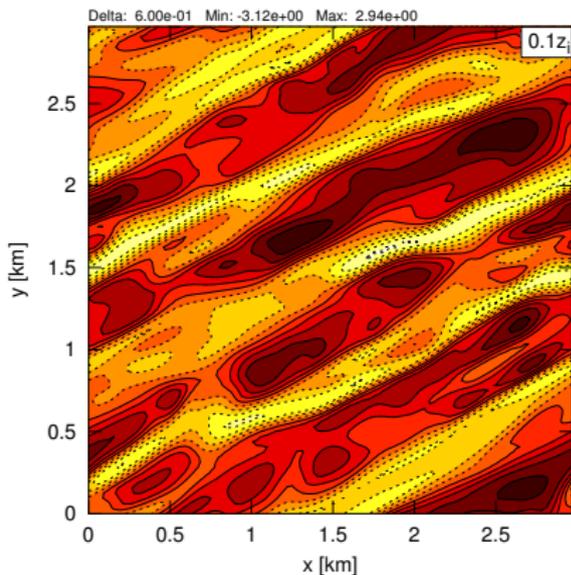
## Librairie physique complète



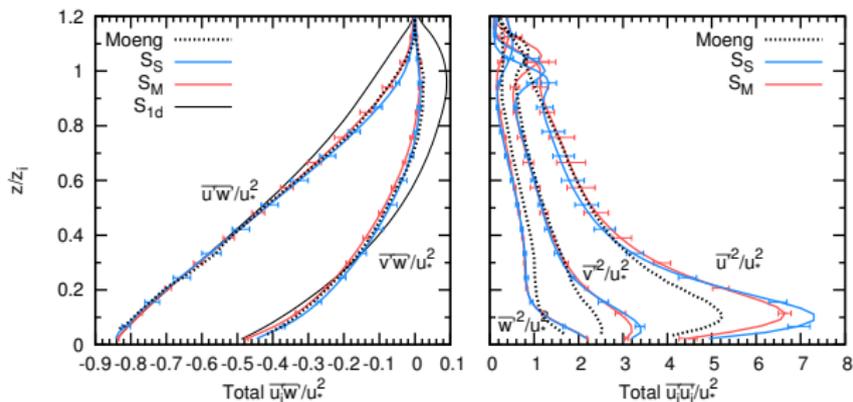
# Coupe instantanée horizontale à $0.1 z_i$

Neutre : u

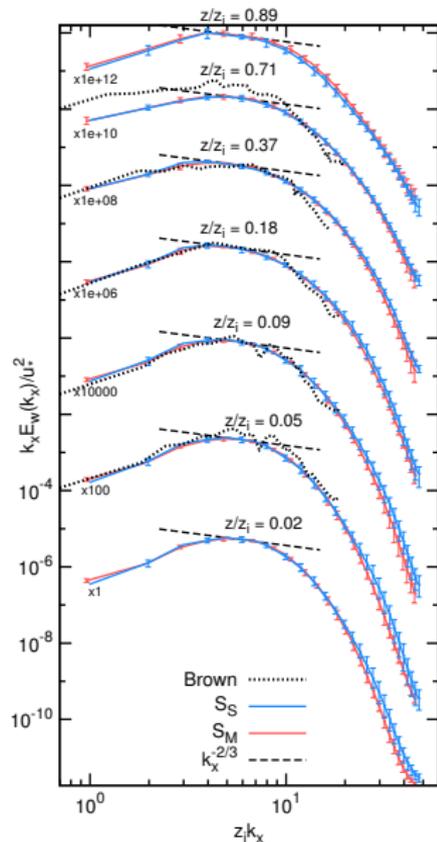
Convectif : w



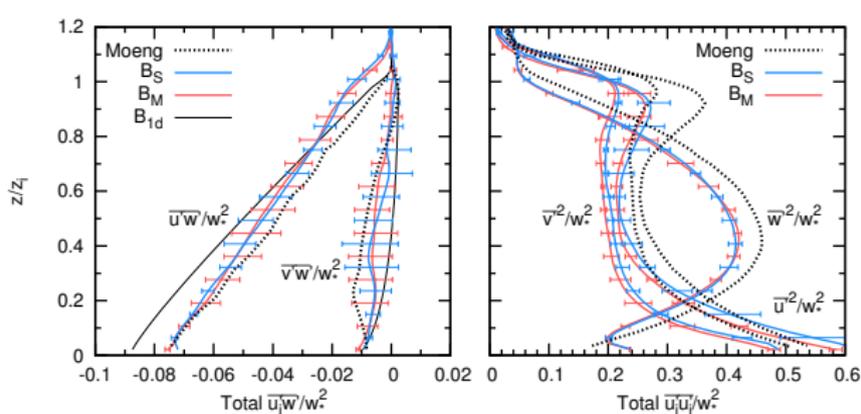
# Comparaison directe : neutre



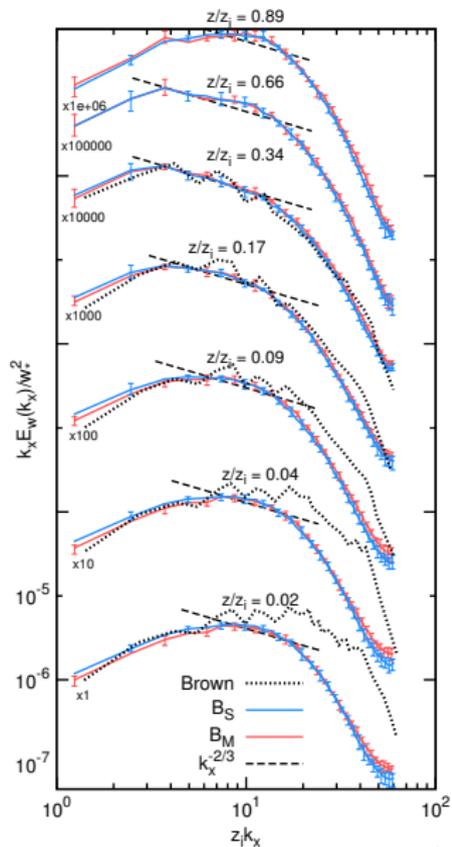
- MS1994 bien reproduit (au-dessus du SL)
- Deux modèles SGS : en accord
- Dispersion dans les résultats
- Modèle colonne : différences notables
- MC2 semble plus dissipatif



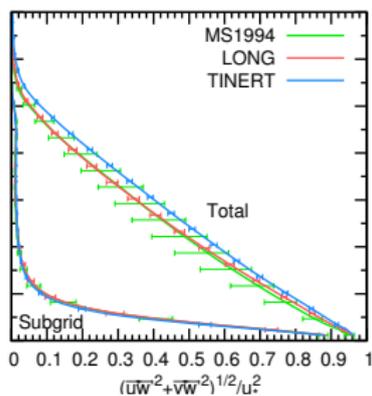
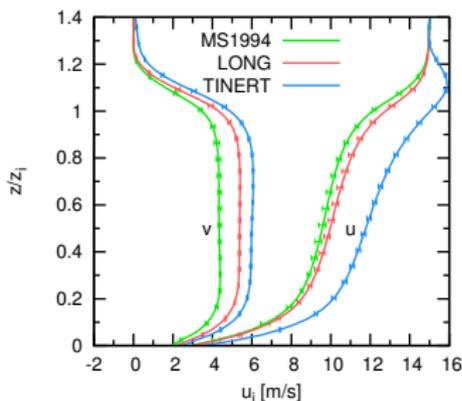
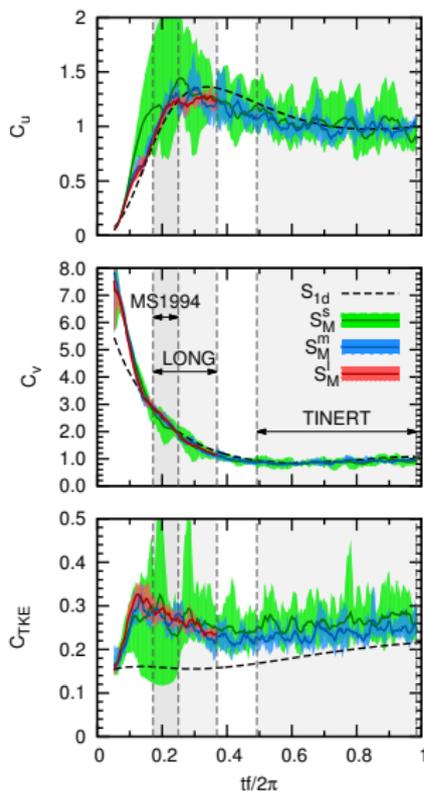
# Comparaison directe : convectif



- MS1994 correctement reproduit mais
  - Dispersion marquée
  - Décalage dans les variances (SGS)
- Deux modèles SGS : en accord
- Modèles colonne : différences notables

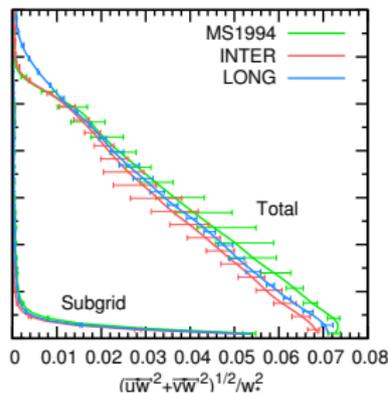
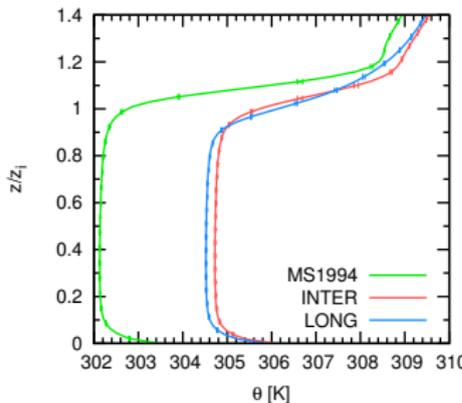
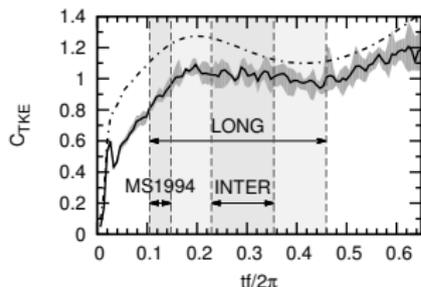
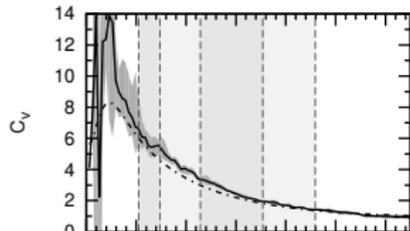
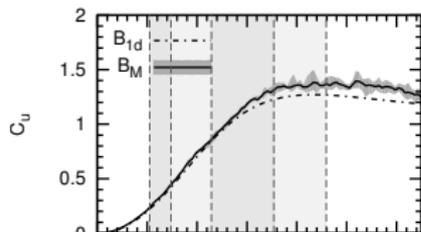


# Paramètres de post-traitement : neutre



- Oscillation inertielle très amortie
  - Régime quasi-stationnaire ( $t > 0.15T_{inert}$ )
  - Tend vers régime permanent ( $t > 0.5T_{inert}$ )
- Hauteur de ABL constante
- Survitesse à l'inversion ( $t > 0.5T_{inert}$ )
- LONG et TINERT : intervalles appropriés

# Paramètres de post-traitement : convectif



- Régime quasi-stationnaire ( $t > 0.1 T_{inert}$ )
  - ABL et  $\theta_{ABL}$  en constante croissance
  - Solution affectée par le toit à  $t > 0.46 T_{inert}$
- Intervalle trop long affecte résultats (LONG)
- INTER : intervalle optimum

# Dispersion des résultats

Dispersion provient de la partie résolue

Toujours présente, elle dépend de :

- Intervalle de post-traitement
- Taille et résolution du maillage

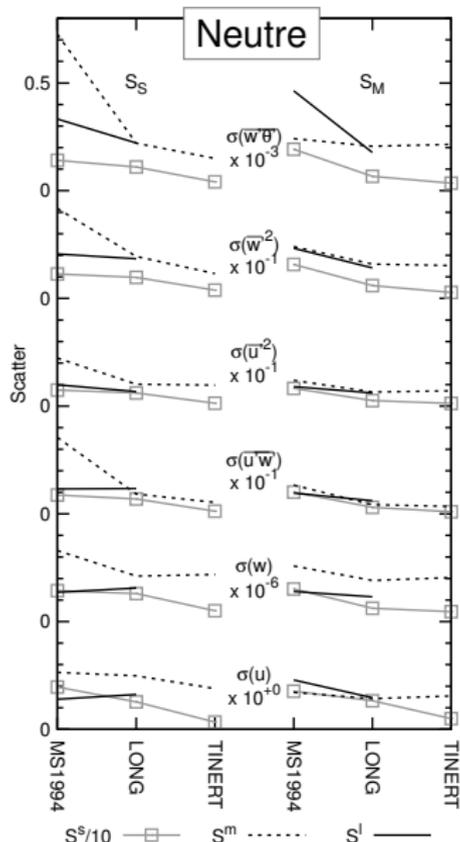
Neutre :

- MS1994 vs LONG (x2.5) : gros impact
- LONG vs TINERT (x2.5) : peu d'impact

Convectif :

- MS1994 vs INTER (x3) : gros impact
- INTER vs LONG (x3) : impact notable

**Intervalle MS1994 trop court**



# Paramètres numériques : grille horizontale

Résolution et taille du maillage horizontal :

Grand  $S^l$  : 96x96,  $\Delta x = 31.25$  m (Moeng, 1994)

Moyen  $S^m$  : 64x64,  $\Delta x = 31.25$  m (Sullivan, 1994)

Petit  $S^s$  : 50x50,  $\Delta x = 40$  m (Ding, 2001)

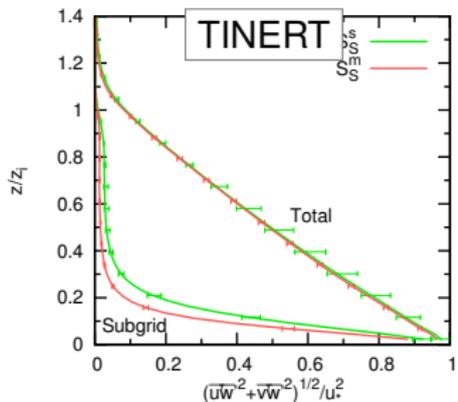
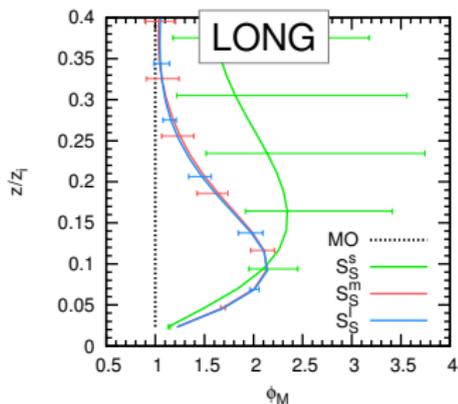
Grand vs Moyen :

- Pas d'impact sur les résultats moyens
- Dispersion légèrement augmentée

Moyen vs Petit :

- Impact classique de l'agrandissement du  $\Delta x$
- Dispersion notablement augmentée

**Petite grille : allumage du régime turbulent retardé et extinctions sporadiques**



# Paramètres numériques : grille verticale

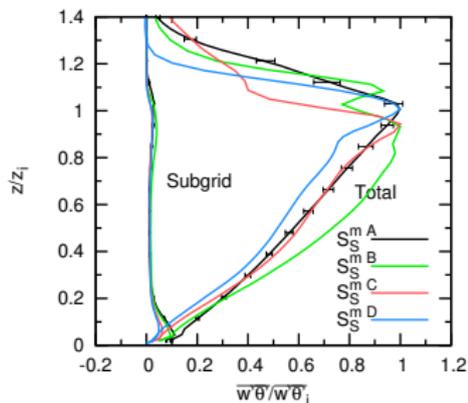
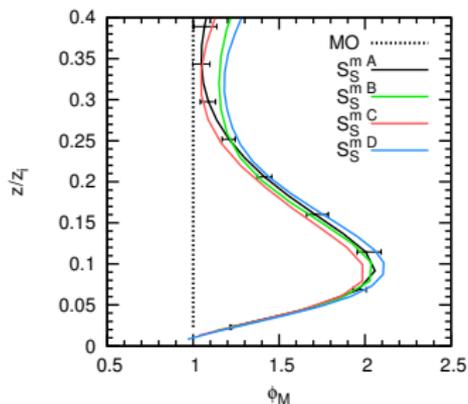
Pour modèles SGS avec  $\Delta = \Delta_H$  :

- Diminuer  $\Delta z$  proche de la paroi
- Augmenter  $\Delta z$  dans ABL ( $\Delta z < \Delta_H$ )
- Augmenter la hauteur du domaine  
=> **Pas d'impact**

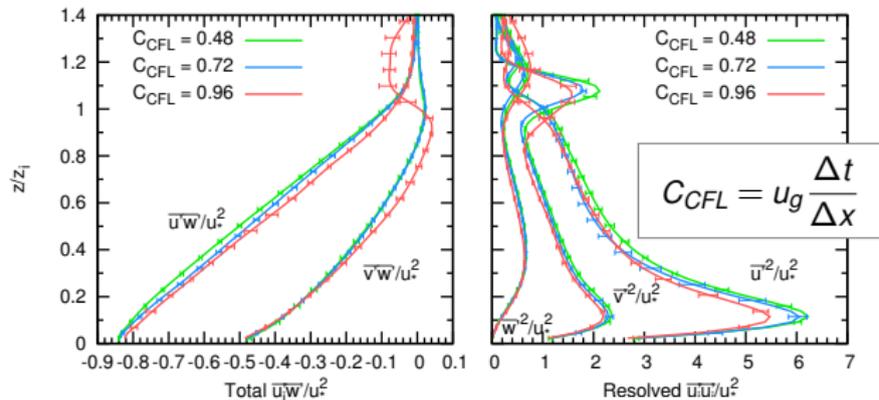
Processus à l'inversion sensible à  $\Delta z$  :

- Plus grand domaine => moins sensible
- Prédiction de  $\overline{w'\theta'_i}$  et  $z_i$  sensible à  $\Delta z$  dans la partie haute de ABL et jusqu'en haut de l'inversion de température

**Grille de Moeng suffisamment haute ;  
Discrétisation valide pour des grilles  
verticales non-uniformes**



# Paramètres numériques : pas de temps



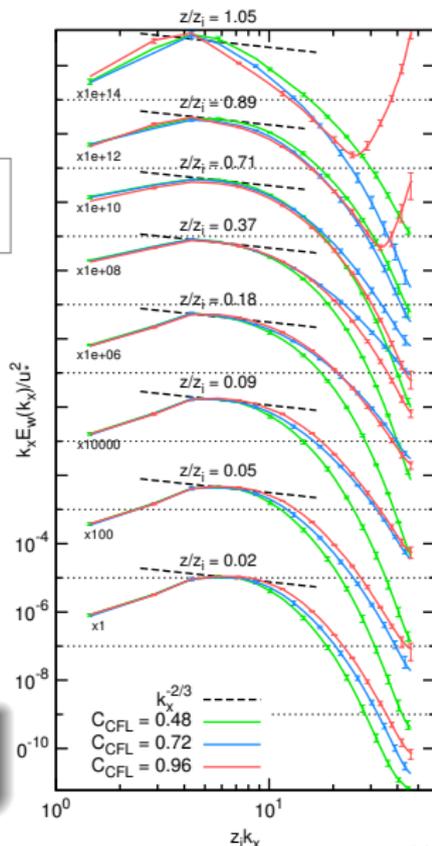
Neutre :  $\max(CFL) = CFL_x$

- $CFL_x \sim 1$  = problème

Convectif :  $\max(CFL) = CFL_z$

- $CFL_z \sim 1$  = pas de problème

**$CFL$  plus bas  $\Rightarrow$  spectres tombent plus vite  
mais peu d'impact sur profils (sauf SL neutre)**



# Discrétisation de la librairie physique

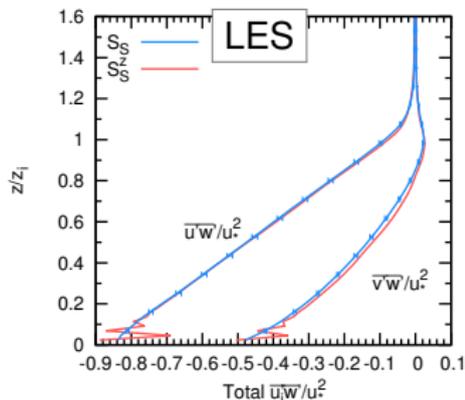
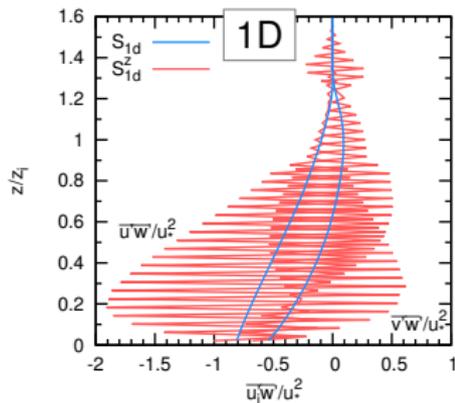
Discrétisation originale :

- Mode numérique pollue la solution
- Pas d'impact au niveau spectral
- Pas d'impact sur les échanges d'énergie (paramètres et résultats moyens en accord)

Nouvelle discrétisation :

- Suppression du mode numérique  
=> gain net pour 1D et la partie SGS

**Mode numérique corrigé ;  
Nouvelle discrétisation valide (en 3D)**

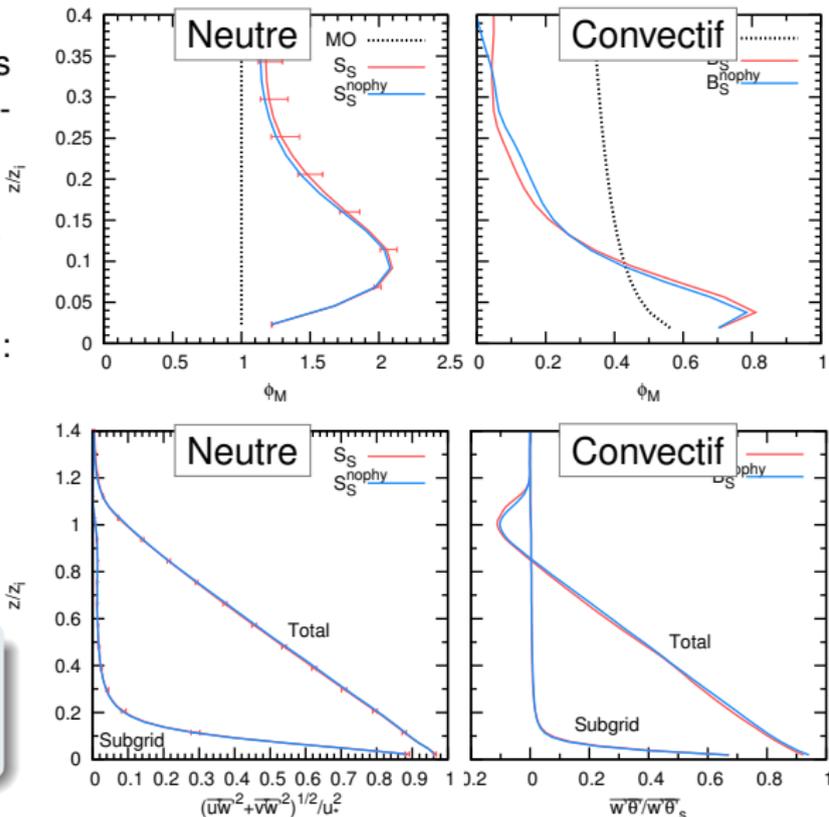


# Approche standard vs standalone

Les deux approches sont en très bon accord malgré des implémentations différentes

- Approche standalone avec diffusion explicite : valide
- Interface librairie physique : pas d'impact sur résultats
- Séparation des termes horizontaux et verticaux : pas d'impact sur résultats

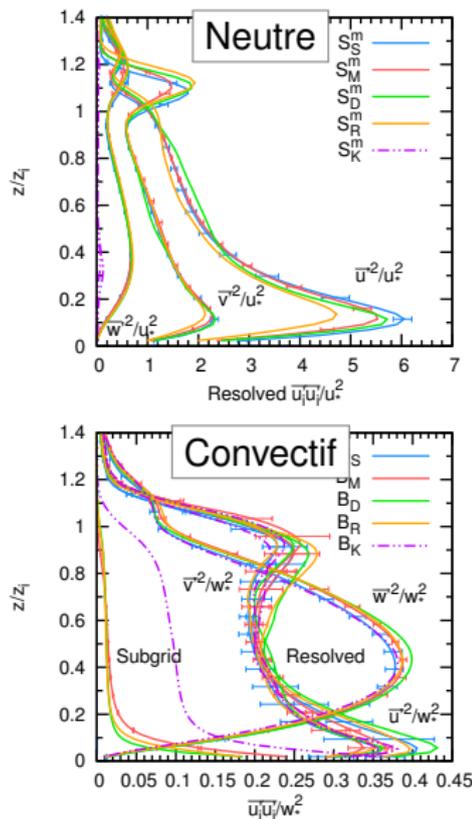
**Diffusion implicite-explicite permet un  $\Delta t$  plus grand pour des résultats analogues**



# Différents modèles SGS

- UKMO Smagorinsky, TKE Hybride et Deardorff : résultats similaires
- Redelsperger : gains dans SL neutre (profils et spectres)
- Kosovic linéaire : problèmes
  - Extinction de la turbulence (neutre)
  - Partie SGS plus grandes  
Cause :  $C_S$  effectif
- Filtre :  $\Delta = \Delta_H$  vs  $\Delta = \Delta_{3d}$ 
  - Léger impact dans les spectres

**Modèles SGS testés :  
peu d'impact (sauf SL neutre)**



# Conclusion

## Améliorations et raffinements d'un modèle mésoéchelle compressible pour la modélisation 3D de la turbulence

- Ajout des termes volumétriques avec la pression
- Amélioration de la discrétisation verticale
- Validation de la séparation espace/temps des termes turbulents
- Évaluation de cinq modèles SGS
- Évaluation des cas neutre et convectif de Moeng (1994)
- Étude de la dispersion des résultats
- Biève étude des paramètres numériques

## Comparaison favorable avec les résultats de la littérature

- MC2-LES plus dissipatif que les modèles de référence

## Base solide pour des travaux futurs

# Transfert de connaissances

## Publication :

- N. Gasset, R. Benoit et C. Masson, "Implementing Large-Eddy Simulation Capability in a Compressible Mesoscale Model", *Monthly Weather Review*, 142(8) :2733–2750, 2014.

## Présentations à des conférences :

- N. Gasset, R. Benoit, et C. Masson, "Refinement and validation of LES methods embedded in a mesoscale model", *Congrès de l'association canadienne de l'énergie éolienne 2010*, Montréal, QC, Canada.
- N. Gasset, R. Benoit et C. Masson, "Refinement and Validation of a LES and URANS Methods Embedded in a Mesoscale Model", *44<sup>ième</sup> congrès de la société canadienne de météorologie et d'océanographie*, 2010, Ottawa, ON, Canada.
- N. Gasset, R. Benoit et C. Masson,, "Toward the Use of a Mesoscale Model at a Very High Resolution", *Congrès de l'association canadienne de l'énergie éolienne 2008*, Vancouver, BC, Canada.
- Gasset, N., Benoit, R., Masson, C., "Toward the use of a mesoscale model at a microscale resolution", *Conférence européenne de l'énergie éolienne 2008*, Bruxelles, Belgique.

# Remerciement

**Étude financée par le réseau stratégique du CRSNG sur  
l'énergie éolienne (WESNet)**



Environnement  
Canada

Environnement  
Canada

***Merci pour votre attention***

# Semi-Implicite Semi-Lagrangien (SISL)

$$\frac{\delta_{tr}\Psi}{2\Delta t} + \bar{\mathbf{L}}^{tr} = \bar{\mathbf{R}}^{tr0} + \mathbf{F}_x^* \quad (1)$$

avec

$$\frac{\delta_{tr}\Psi}{2\Delta t} = \frac{\Psi_x^+ - \Psi_{x-2\alpha}^-}{2\Delta t} \quad \text{avec} \quad \alpha = \Delta t \mathbf{v}_{x-\alpha}^0 \quad (2)$$

$$\bar{\mathbf{L}}^{tr} = \frac{(1+\varepsilon)\mathbf{L}_x^+ + (1-\varepsilon)\mathbf{L}_{x-2\alpha}^-}{2} \quad (3)$$

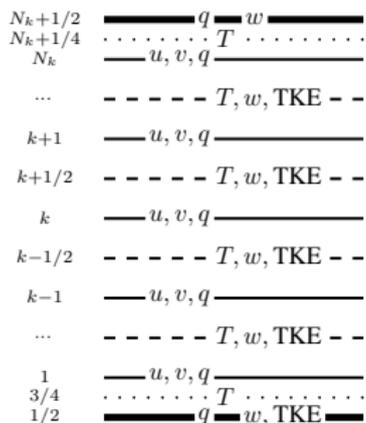
$$\bar{\mathbf{R}}^{tr0} = \frac{(1+\varepsilon)\mathbf{R}_x^0 + (1-\varepsilon)\mathbf{R}_{x-2\alpha}^0}{2} \quad (4)$$

qui devient

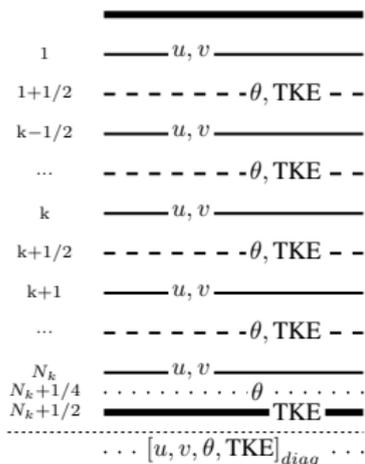
$$[\Psi^+ + \Delta t^+ \mathbf{L}^+]_x = [\Psi^- - \Delta t^- \mathbf{L}^- + \Delta t^- \mathbf{R}^0]_{x-2\alpha} + [\Delta t^+ \mathbf{R}^0 + 2\Delta t \mathbf{F}^*]_x \quad (5)$$

# Discrétisation verticale

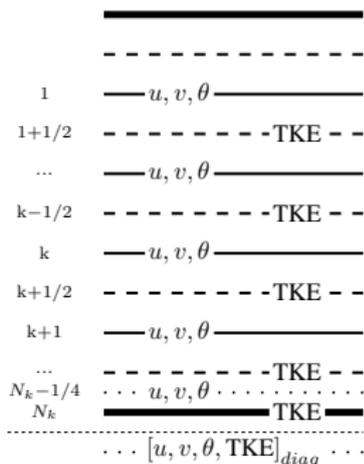
a) Dynamique



b) Nouvelle librairie physique



c) Librairie physics originale



Discrétisation verticale des principales composantes du modèle

# Cas microéchelle : paramètres numériques

$S$  = cas neutre (shear) ;  $B$  = cas convectif (buoyancy).

Nom	Modèle	$L_{x_i}$ [km]	$L_z$ [km]	$N_x \times N_y \times N_z$	$u_g$ [m/s]	$\overline{w'\theta'_s}$ [K m/s]	$\Delta t$ [s]
$S_{1d}$	$k - l$ column	0.3	1	$3 \times 3 \times 96$	15	0.0	2
$S_S$	Smagorinsky	3	1	$96 \times 96 \times 96$	15	0.0	1.5
$S_M$	TKE hybrid	3	1	$96 \times 96 \times 96$	15	0.0	1.5
$B_{1d}$	$k - l$ column	0.3	2	$3 \times 3 \times 96$	10	0.24	4
$B_S$	Smagorinsky	5	2	$96 \times 96 \times 96$	10	0.24	4
$B_M$	TKE hybrid	5	2	$96 \times 96 \times 96$	10	0.24	4

# Évaluation des paramètres numériques

$S$  = cas neutre (shear) ;  $B$  = cas convectif (buoyancy).

Name	Model	$N_x \times N_y \times N_z$	$L_{x_i}$ [km]	$L_z$ [km]	$\Delta t$ [s]	Iteration max.
$S_{1d}$	$k - l$ column	$3 \times 3 \times 96$	0.3	1	2	60000
$S_S^s$	Smagorinsky SGS	$50 \times 50 \times 96$	2	1	2	30000
$S_S^m$		$64 \times 64 \times 96$	2	1	1.5	40000
$S_S^l (\equiv S_S)$		$96 \times 96 \times 96$	3	1	1.5	15000
$S_M^s$	Hybrid TKE SGS	$50 \times 50 \times 96$	2	1	2	30000
$S_M^m$		$64 \times 64 \times 96$	2	1	1.5	40000
$S_M^l (\equiv S_M)$		$96 \times 96 \times 96$	3	1	1.5	15000
$B_{1d}$	$k - l$ column	$3 \times 3 \times 96$	0.3	2	4	10000
$B_S$	Smagorinsky SGS	$96 \times 96 \times 96$	5	2	4	10000
$B_M$	Hybrid TKE SGS	$96 \times 96 \times 96$	5	2	4	10000