

Séminaires RPN

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

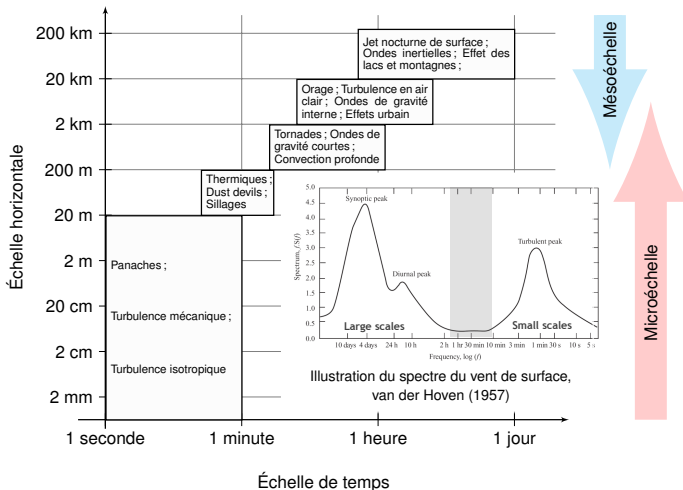
- Contexte et objectifs
- Méthodologie
- Évaluation et validation
- Conclusion



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**

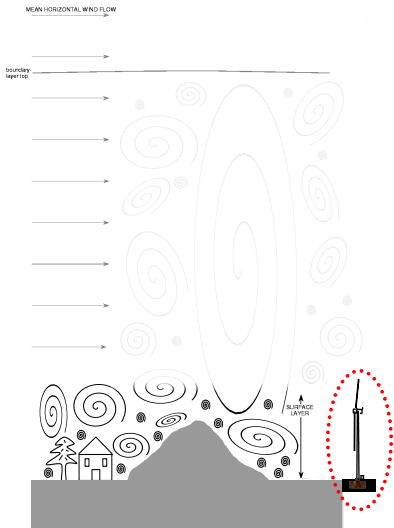


Illustration des processus prenant place au sein du SL

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 (Δx)
- $\Delta x < 1$ km possible mais ...

Essentiel pour :

Prévision du vent et évaluation de la ressource à grande échelle

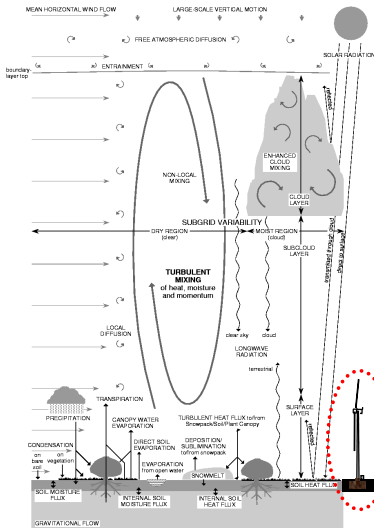


Illustration des processus prenant place au sein de ABL
(source : blg.coas.oregonstate.edu/)

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

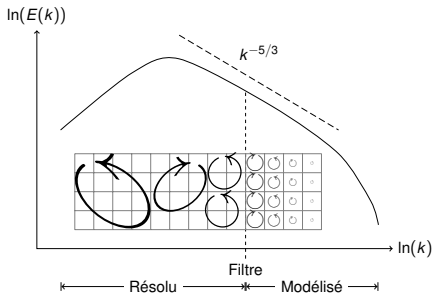


Schéma du spectre d'énergie cinétique

Rejoint sous certains aspects la modélisation mésoéchelle

LES appliquée à l'ABL

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

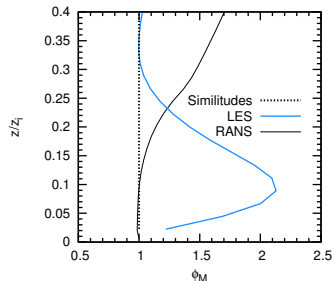
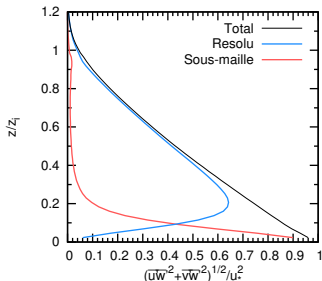


Illustration de résultats typiques de LES de l'ABL (Smagorinsky/Deardorff)

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)

- Prédiction 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

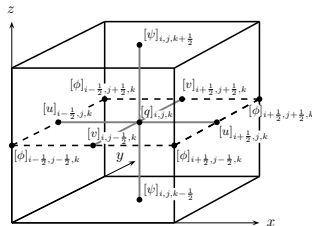
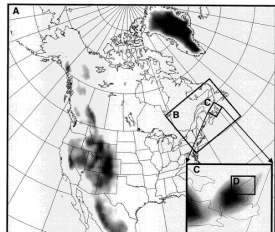
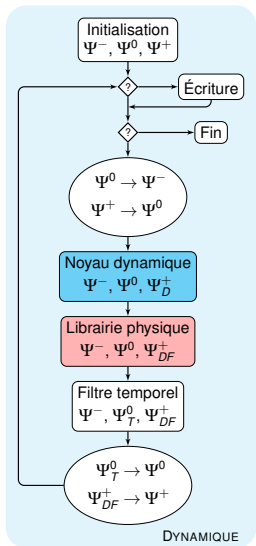


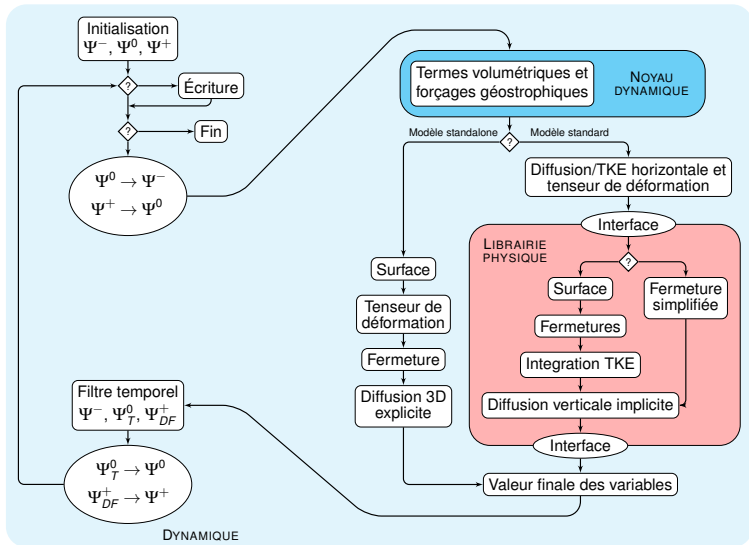
Illustration d'une cascade ($\Delta x = 50$ km à 0.4 km), Benoit et al. (1997) (en haut) et élément de maillage (en bas)

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

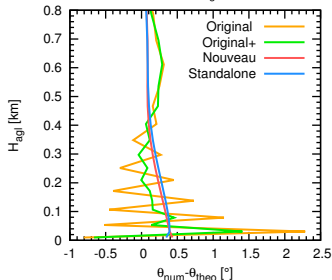
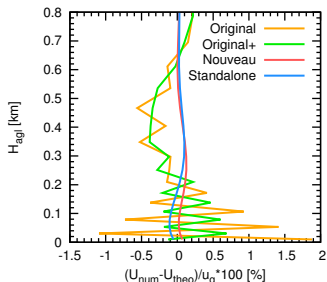
- Onde de montagnes : pas de librairie physique (pas de turbulence)
- Ekman : librairie physique simplifiée (RANS algébrique)
- Microéchelle : librairie physique complète (RANS ou LES)

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

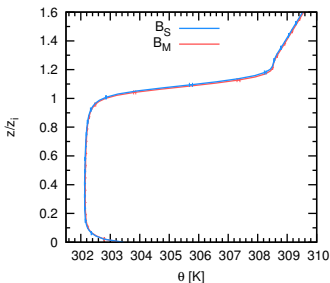
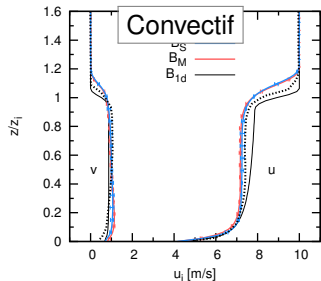
Initialisation

- Profils initiaux : u_g, θ
- 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

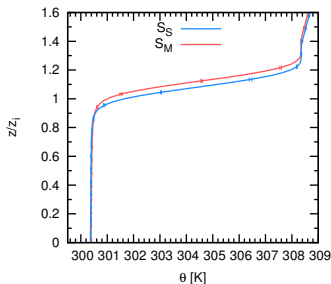
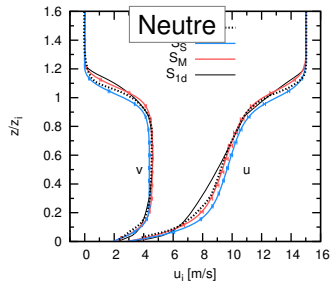
Initialisation

- Profils initiaux : u_g, θ
- Perturbation aléatoire de vitesse
- Surface terrestre chauffante

Conditions limites

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

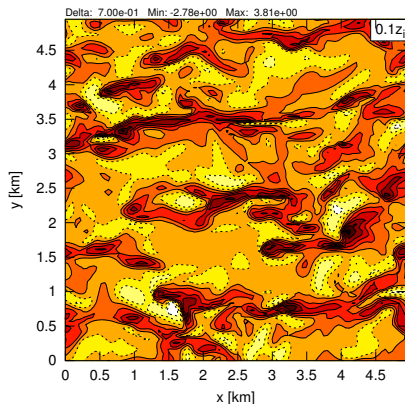
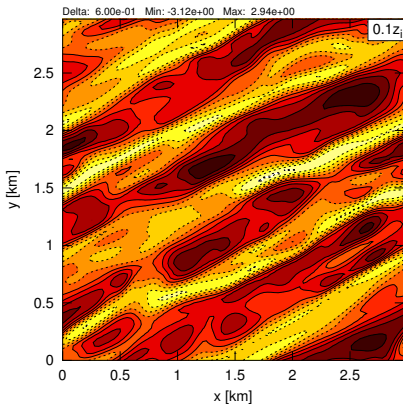
Librairie physique complète



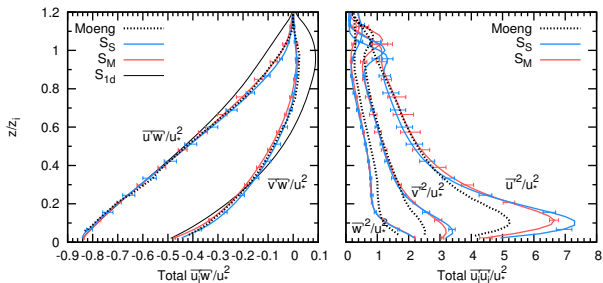
Coupe instantanée horizontale à $0.1 z_i$

Neutre : u

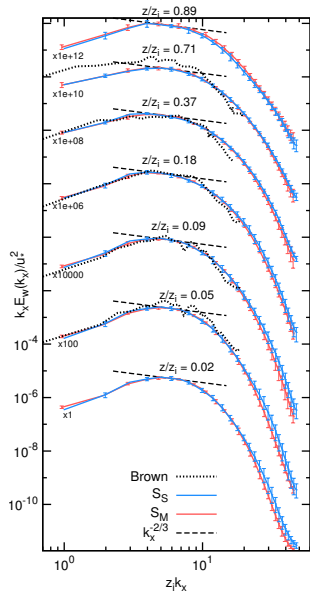
Convectif : w



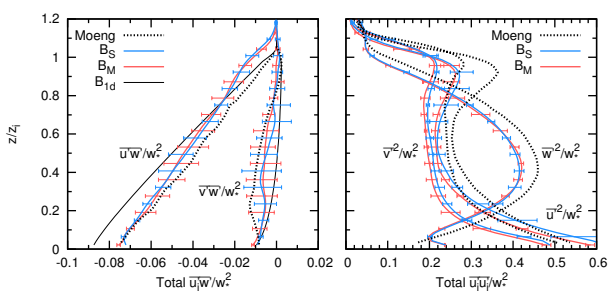
Comparaison directe : neutre



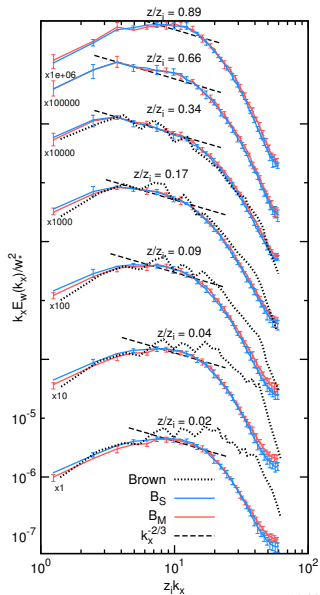
- MS1994 bien reproduit (au-dessus du SL)
- Deux modèles SGS : en accord
- Dispersion dans les résultats
- Modèle colonne : différences notables
- MC2 semble plus dissipatif



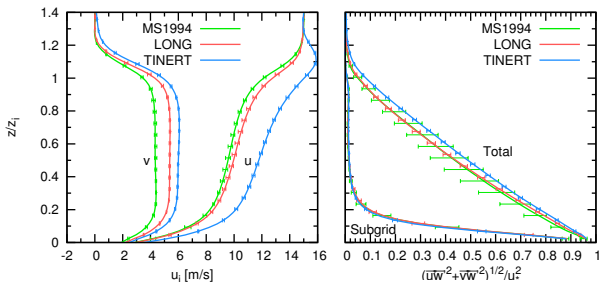
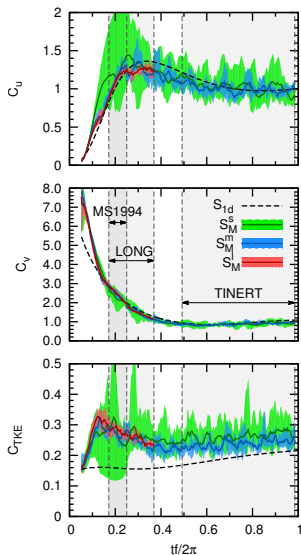
Comparaison directe : convectif



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

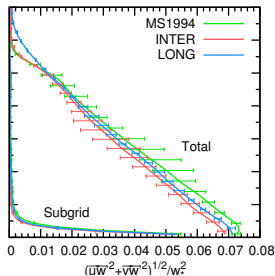
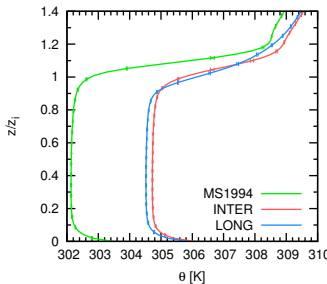
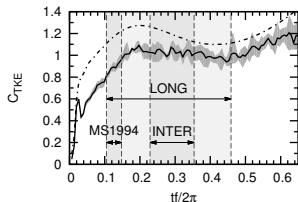
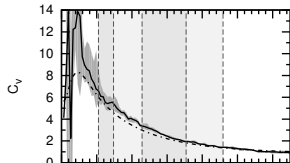
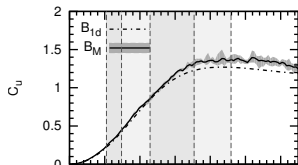


Paramètres de post-traitement : neutre



- 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 θ_{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

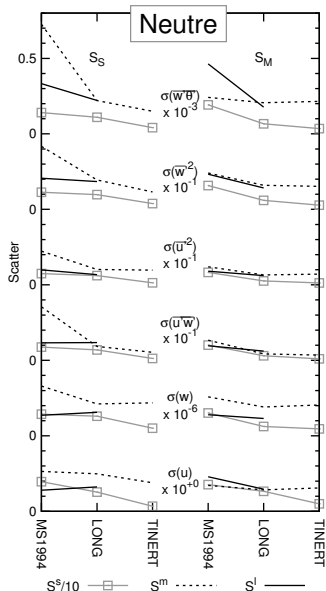
Neutre :

- 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)

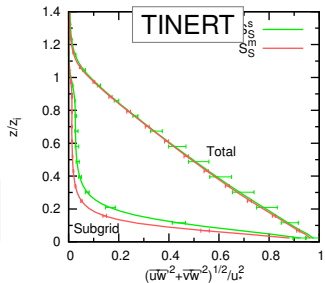
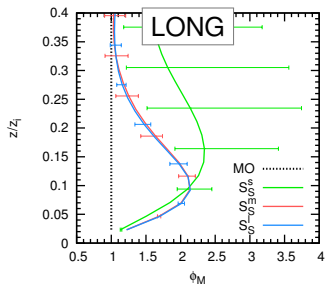
Grand vs Moyen :

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

Moyen vs Petit :

- Impact classique de l'agrandissement du Δx
- Dispersion notablement augmentée

Petite grille : allumage du régime turbulent retardé et extinctions sporadiques



Paramètres numériques : grille verticale

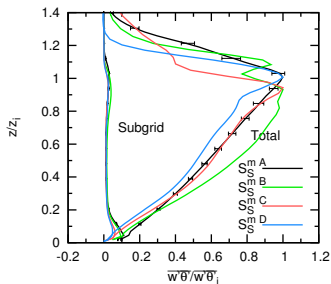
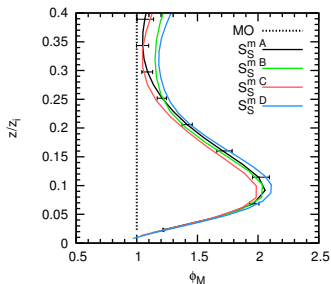
Pour modèles SGS avec $\Delta = \Delta_H$:

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

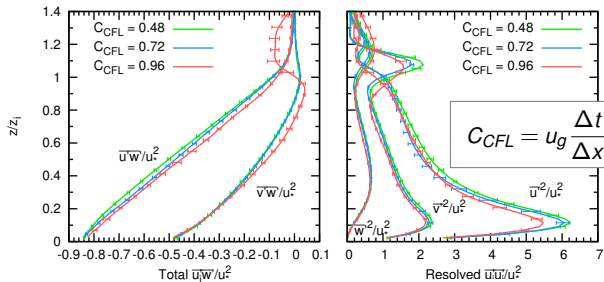
Processus à l'inversion sensible à Δz :

- Plus grand domaine => moins sensible
- Prédiction de $\overline{w'\theta'_i}$ et z_i sensible à Δz 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



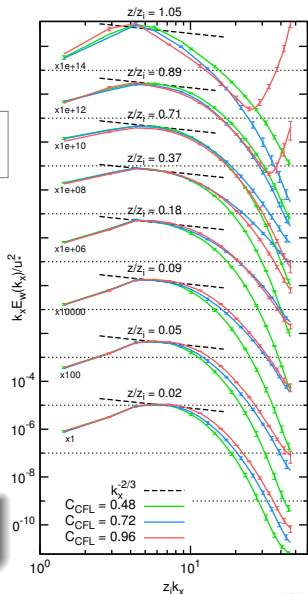
Neutre : $\max(CFL) = CFL_x$

- $CFL_x \sim 1$ = 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

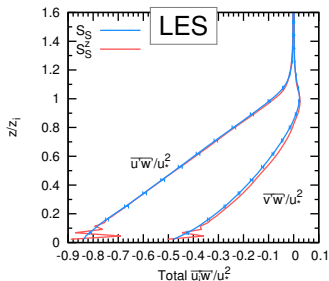
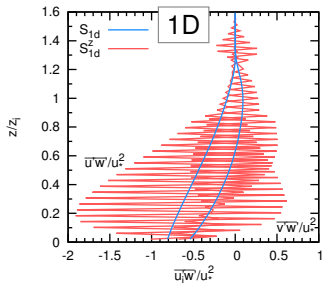
Discrétisation originale :

- 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)**

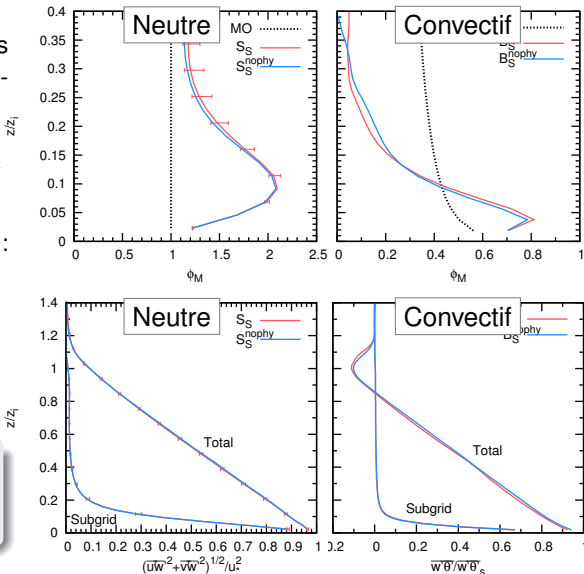


Approche standard vs standalone

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

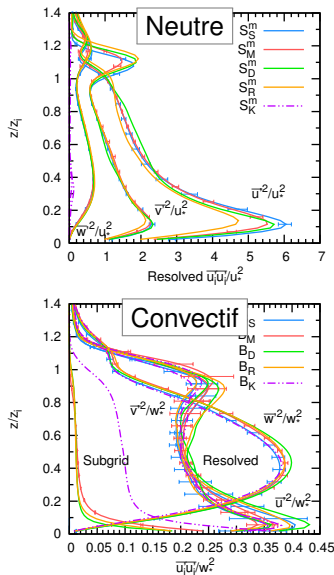
Diffusion implicite-explicite permet un Δt plus grand pour des résultats analogues



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^{ième} 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

$$\frac{\delta_{tr}\Psi}{2\Delta t} = \frac{\Psi_x^+ - \Psi_{x-2\alpha}^-}{2\Delta t} \quad \text{avec} \quad \alpha = \Delta t v_{x-\alpha'}^0 \quad (2)$$

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

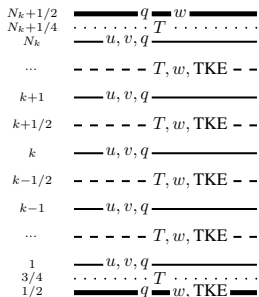
$$\bar{\mathbf{R}}^{tr0} = \frac{(1+\varepsilon)\mathbf{R}_x^0 + (1-\varepsilon)\mathbf{R}_{x-2\alpha}^0}{2} \quad (4)$$

qui devient

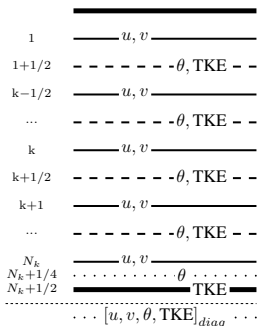
$$[\Psi^+ + \Delta t^+ \mathbf{L}^+]_x = [\Psi^- - \Delta t^- \mathbf{L}^- + \Delta t^- \mathbf{R}^0]_{x-2\alpha} + [\Delta t^+ \mathbf{R}^0 + 2\Delta t \mathbf{F}^*]_x \quad (5)$$

Discrétisation verticale

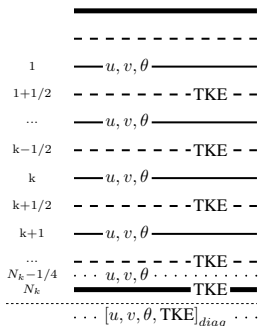
a) Dynamique



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]	Δt [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]	Δt [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