



# Physical Parametrizations

Rachid Benshila, Xavier Capet

$$\begin{aligned} \frac{D \langle \mathbf{u}_h \rangle}{Dt} + f \mathbf{k} \times \langle \mathbf{u}_h \rangle &= \frac{\nabla_h p}{\rho_0} - \nabla \cdot \langle \mathbf{u}'_h \mathbf{u}'_h \rangle - \partial_z \langle w' \mathbf{u}'_h \rangle \\ \partial_z p &= -g \rho' \\ \nabla \cdot \langle \mathbf{u} \rangle &= 0 \\ \frac{D \langle T \rangle}{Dt} &= -\frac{\partial_z Q_s}{\rho_0 C_{p,o}} - \nabla_h \cdot \langle \mathbf{u}'_h T' \rangle - \partial_z \langle w' T' \rangle \\ \frac{D \langle S \rangle}{Dt} &= -\nabla_h \cdot \langle \mathbf{u}'_h S' \rangle - \partial_z \langle w' S' \rangle \\ \rho &= \rho_{\text{eos}}(\langle T \rangle, \langle S \rangle, z) \end{aligned}$$

Turbulence assimilée à du mélange

$$\langle X' w' \rangle = -K_X(z) \partial_z \langle X \rangle, \quad X = u, v, T, S$$

Comment sont calculés  $K_X(z)$ ,  $\langle X' w' \rangle_{\text{sfc}}$  et  $\langle X' w' \rangle_{\text{bot}}$  ?

# Calcul de $\langle X'w' \rangle$

$$\begin{aligned}
 -\langle \mathbf{u}'_h w' \rangle_{\text{sfc}} &= \boldsymbol{\tau} / \rho_o & -\langle \mathbf{u}'_h w' \rangle_{\text{bot}} &= \boldsymbol{\tau}_b / \rho_o \\
 -\langle T' w' \rangle_{\text{sfc}} &= Q_H / (\rho_o C_{p,o}) & -\langle T' w' \rangle_{\text{bot}} &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -\langle \mathbf{u}'_h w' \rangle (z) &= K_m(z) \partial_z \langle \mathbf{u}_h \rangle \\
 -\langle T' w' \rangle (z) &= K_s(z) \partial_z \langle T \rangle
 \end{aligned}$$

| Nom          | Variable                 | unités                     |
|--------------|--------------------------|----------------------------|
| sustr        | $\tau_x / \rho_0$        | $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ |
| svstr        | $\tau_y / \rho_0$        | $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ |
| stflx(itemp) | net heat flux            | $\text{K m s}^{-1}$        |
| srflx        | $Q_s / (\rho_0 C_{p,o})$ | $\text{K m s}^{-1}$        |
| bustr        | $\tau_{b,x} / \rho_0$    | $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ |
| bvstr        | $\tau_{b,y} / \rho_0$    | $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ |
| Akv          | $K_m$                    | $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ |
| Akt          | $K_s$                    | $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ |

## Conditions aux limites :

- flux turbulents au fond
- flux turbulents en surface

## Mélange :

- formulations analytiques
- formulation diagnostique
- formulation prognostique

## Calcul du flux turbulent de fond

$$\begin{aligned} - \langle \mathbf{u}'_h w' \rangle_{\text{bot}} &= \boldsymbol{\tau}_b / \rho_o \\ - \langle T' w' \rangle_{\text{bot}} &= 0 \end{aligned}$$

# Paramétrisation de la friction de fond

Forme générale pour les équations 3D (cf get\_vbc.F) :

- Si  $z_{0,b} \neq 0 \rightarrow$  friction quadratique avec loi log ( $C_{d,\min} \leq C_d \leq C_{d,\max}$ )

$$\boldsymbol{\tau}_b = C_d \|\mathbf{u}_{k=1}\| \mathbf{u}_{k=1}, \quad C_d = \left( \frac{\kappa}{\ln([z_1 - H]/z_{0,b})} \right)^2$$

- Si  $r_{\text{drg2}} > 0 \rightarrow$  friction quadratique à  $C_d$  constant

$$\boldsymbol{\tau}_b = r_{\text{drg2}} \|\mathbf{u}_{k=1}\| \mathbf{u}_{k=1},$$

- Sinon  $\rightarrow$  friction linéaire

$$\boldsymbol{\tau}_b = r_{\text{drg}} \mathbf{u}_{k=1},$$

Dans le mode barotrope (cf step2D.F) :

$$\boldsymbol{\tau}_b^{2d} = (r_{\text{drg}} + r_{\text{drg2}} \|\bar{\mathbf{u}}\|) \bar{\mathbf{u}}$$

## Calcul des flux turbulents de surface

$$\begin{aligned} - \langle \mathbf{u}'_h w' \rangle_{\text{sfc}} &= \boldsymbol{\tau} / \rho_o \\ - \langle T' w' \rangle_{\text{sfc}} &= Q_H / (\rho_o C_{p,o}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \langle \mathbf{u}'_h w' \rangle_{\text{sfc}} &= C_D \|\Delta \mathbf{u}\| \Delta \mathbf{u}, & \Delta \mathbf{u} &= \mathbf{u}_{\text{air}} - \mathbf{u}_{k=N} \\ - \langle \mathbf{u}'_h T' \rangle_{\text{sfc}} &= C_H \|\Delta \mathbf{u}\| \Delta T, & \Delta T &= T_{\text{air}} - T_{k=N} \end{aligned}$$

**=> Différentes formulations**



## Formulation COARE (bulk\_flux.F, [BULK\_FAIRALL])

Formulation plus "classique" (  $\|\boldsymbol{\tau}\|/\rho_a = u_*^2$ ,  $Q_H/(\rho_a C_{p,a}) = u_*\theta_*$  )

$$\langle u(z) \rangle - \langle u(z_{0,m}) \rangle = u_* \kappa^{-1} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_{0,m}} \right) + \psi_m \left( \frac{z}{L_{MO}} \right) \right]$$

$$\langle \theta(z) \rangle - \langle \theta(z_{0,h}) \rangle = \theta_* \kappa^{-1} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_{0,h}} \right) - \psi_s \left( \frac{z}{L_{MO}} \right) \right]$$

$L_{MO} = L_{MO}(u_*, \theta_*) \rightarrow$  système nonlinéaire résolu itérativement (Itermax = 3)

### Caractéristiques de la formule COARE

- Calcul de la longueur de rugosité :  $z_{0,m} = \alpha_{ch}(u_*^2/g) + \alpha_m(\nu_a/u_*)$
- longueur caractéristique pour les traceurs :  $z_{0,h} = 5.5 \times 10^{-5} \left( \frac{z_{0,m} u_*}{\nu_a} \right)^{-3/5}$
- Fonctions de stabilité  $\rightarrow$  Beljaars & Holtslag (1991), Grachev et al. (2000)
- Cas de la convection libre :  $w_* = \beta \left( \frac{g Q_H z_{bl}}{\langle \theta \rangle} \right)^{1/3}$  (cas stable),  $z_{bl} = 600$  m
- L'implémentation CROCO suppose que les données atmosphériques sont à 10 m

## Mais encore ...

- **[SST\_SKIN]** (sstskin.F) SST *skin* à la Zeng & Beljaars (2005)  
⇒ Extrapolation vers la surface de  $T_{k=N}$  (développé pour les modèles de climat avec  $H_{z_N} \approx 10$  m).
- **[RELATIVE\_WIND]**  
Utilisation des vents relatifs  $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{air}} - \mathbf{u}_{k=N}$  dans le calcul des flux.  
⇒ à éviter en mode forcé (e.g. Renault et al., 2016)
- **[ANA\_SRFLUX]**  
Applique analytiquement un cycle diurne sur le flux solaire moyen en entrée

# RÉSUMÉ

|                |   |
|----------------|---|
| BULK_FLUX      | Activate bulk formulation for surface turbulent fluxes (by default, COARE3p0 parametrization is used)                   |
| BULK_ECUMEV0   | Use ECUMEv0 bulk formulation instead of COARE3p0 formulation  |
| BULK_ECUMEV6   | Use ECUMEv6 bulk formulation instead of COARE3p0 formulation  |
| BULK_WASP      | Use WASP bulk formulation instead of COARE3p0 formulation   |
| BULK_GUSTINESS | Add in gustiness effect on surface wind module. Can be used for both bulk parametrizations.                             |
| BULK_LW        | Add in long-wave radiation feedback from model SST  |
| SFLUX_CFB      | Activate current feedback on ... (Renault et al., 2020)   |
| CFB_STRESS     | ... surface stress (used by default when SFLUX_CFB is defined)  |
| CFB_WIND_TRA   | ... surface tracers (used by default when SFLUX_CFB is defined)   |
| SST_SKIN       | Activate skin sst computation (Zeng & Beljaars, 2005)   |
| ONLINE         | Read native files and perform online interpolation on CROCO grid (default cubic interpolation)                          |
| QCORRECTION    | Activate heat flux correction around model SST (if BULK_FLUX is undefined)  |
| SFLX_CORR      | Activate freshwater flux correction around model SSS (if BULK_FLUX is undefined)  |
| ANA_DIURNAL_SW | Activate analytical diurnal modulation of short wave radiations (only appropriate if there is no diurnal cycle in data) |

# Schémas idéalisés pour le mélange vertical

# Schéma basé sur $N^2$ et ANA\_VMIX

## [BVF\_MIXING]

- Si  $N^2(z) < 0$  :

$$K_{m,s}(z) = 0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

- Si  $N^2(z) > 0$  :

$$K_{m,s}(z) = 10^{-7} / \sqrt{N^2(z)}, \quad K_{m,s}^{\min} \leq K_{m,s}(z) \leq K_{m,s}^{\max}$$

Bornes par défaut très restrictives :

$$K_{m,s}^{\min} = 3 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \quad K_{m,s}^{\max} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

## [ANA\_VMIX]

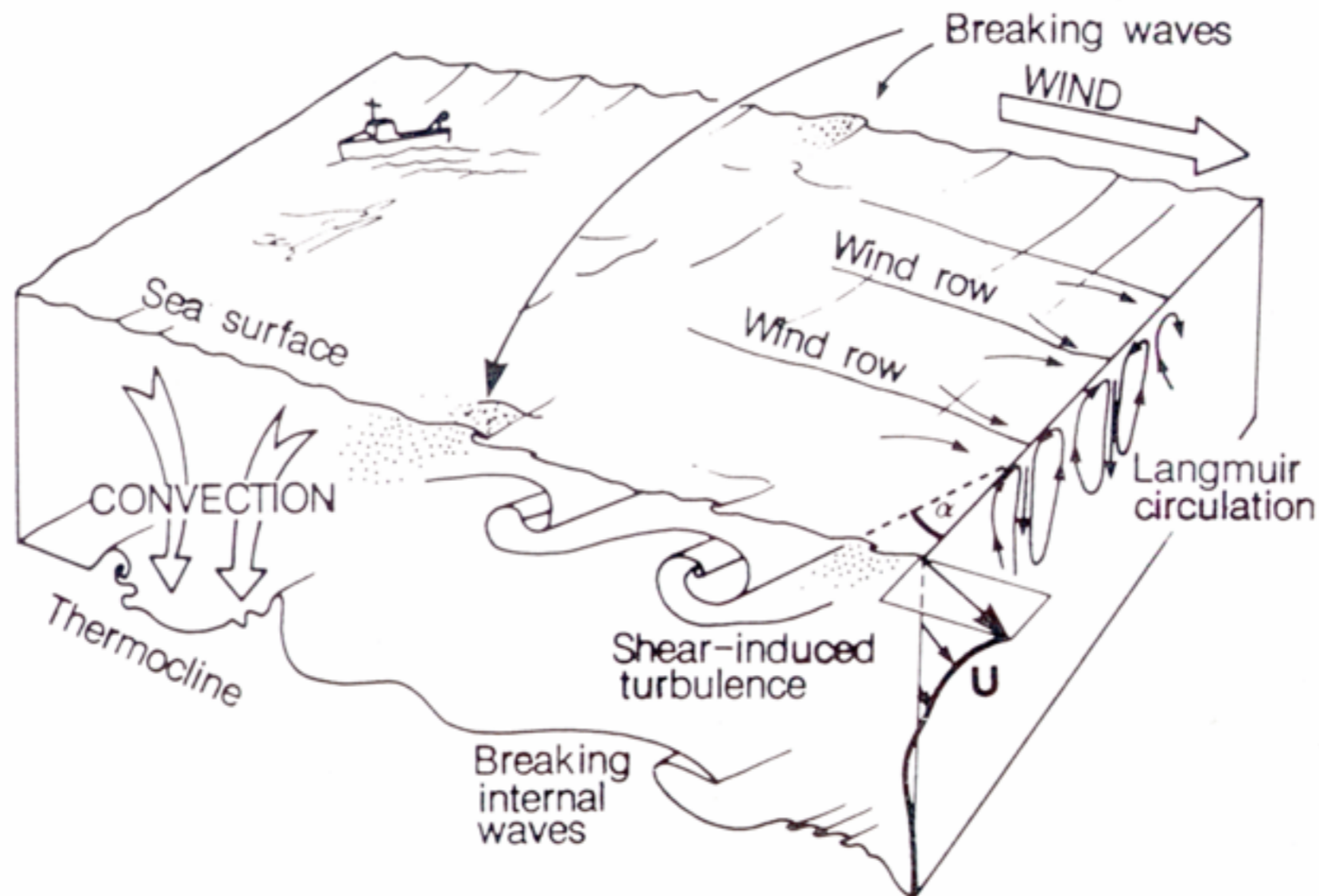
Possibilité de spécifier analytiquement  $K_{m,s}(z)$   
(subroutine ana\_vmix appelée à chaque pas de temps)

## Schémas pour la couche limite de surface

The near-surface of the ocean is generally well-mixed over typical vertical scales of meters to thousands of meters. Much finer scales are implicated in the dynamics of the mixed layer (3D turbulence and mixing on scales of  $\sim 1$  mm + heterogeneities on similar scales eg in the so called skin layer and this can be critical for air-sea exchanges of heat, gas ...).

There are many :

- turbulence regimes to be accounted for
- processes involved in every turbulence regimes



# Surface K-Profile Parameterization 1994 (Large et al., 1994)

[LMD\_SKPP1994, LMD\_SKPP\_MONOB, HBL\_SMOOTH]

- 1 Calcul de la profondeur de couche limite  $h_{bl}$  ( $z_r \rightarrow z_N$ )

$$\text{Ri}_b(z) = \frac{g(z_r - z) (\rho(z) - \rho_r) / \rho_0}{|\mathbf{u}(z) - (\mathbf{u}_h)_r|^2 + V_t^2(z)}, \quad \text{Ri}_b(-h_{bl}) = \text{Ri}_{cr}$$

- 2 Dans le cas stable ( $B_f > 0$ ) :  $h_{bl} = \min(h_{ek}, h_{mo})$

$$h_{ek} = 0.7u_\star/f, \quad h_{mo} = u_\star^3/(\kappa B_f).$$

- 3 Calcul des viscosités et diffusivités turbulentes

$$K_{m,s}(z) = w_{m,s} h_{bl} G(z/h_{bl}), \quad w_{m,s} = \kappa u_\star \psi_{m,s}(zB_f/u_\star^3)$$

Choix de  $\text{Ri}_{cr}$  ?  $\text{Ri}_{cr} \in [0.15, 0.45]$



# Surface K-Profile Parameterization 2005 (Shchepetkin, 2005)

[LMD\_SKPP2005, LIMIT\_UNSTABLE\_ONLY, HBL\_SMOOTH]

- Critère pour  $h_{bl}$  : couche intégrale où la production de turbulence par cisaillement équilibre la dissipation due à la stratification

$$\text{Cr}(z) = \int_z^\zeta \mathcal{K}(z') \left\{ |\partial_{z'} \mathbf{u}_h|^2 - \frac{N^2}{\text{Ri}_{cr}} - C_{Ek} f^2 \right\} dz' + \frac{V_t^2(z)}{(\zeta - z)}, \quad \text{Cr}(-h_{bl}) = 0$$

- Consistant avec la physique originelle de KPP

$$\text{Cr}(-h_{bl}) = 0 \Rightarrow \frac{(\zeta - z) \int_z^\zeta \mathcal{K}(z') N^2(z') dz'}{(\zeta - z) \int_z^\zeta \mathcal{K}(z') \left\{ |\partial_z \mathbf{u}_h|^2 - C_{Ek} f^2 \right\} dz' + V_t^2(z)} = \text{Ri}_{cr}$$

→ cohérent avec problème d'Ekman

→ tend à produire des couches limites plus profondes

$$(\zeta - z) \int_z^\zeta |\partial_{z'} \mathbf{u}_h|^2 dz' \geq |\mathbf{u}_h(z) - \mathbf{u}_h(\zeta)|^2.$$

# Schéma pour l'océan intérieur et ajustement convectif

$$K_{m,s}(z) = K_{m,s}^{\text{sh}}(z) + K_{m,s}^{\text{iw}}(z) + K_{m,s}^{\text{dd}}(z)$$

- **[LMD\_RIMIX, RI\_(H - V)SMOOTH]** (Large et al., 1994)

$$\text{Ri}_g = N^2 / [(\partial_z u)^2 + (\partial_z v)^2]$$

$$K_{m,s}^{\text{sh}}(z) = \begin{cases} K_{0,c} & \text{Ri}_g < 0 \quad \leftarrow \text{[LMD_CONVEC]} \\ K_0 [1 - (\text{Ri}_g/\text{Ri}_0)^3] & 0 < \text{Ri}_g < \text{Ri}_0 \\ 0 & \text{Ri}_0 < \text{Ri}_g \end{cases}$$

$$K_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \text{ Ri}_0 = 0.7.$$

- **[LMD\_NUW\_GARGETT]** (Gargett & Holloway)

$$K_m^{\text{iw}}(z) = 10^{-6} / \sqrt{\max(N^2(z), 10^{-7})}, \quad K_s^{\text{iw}}(z) = 10^{-7} / \sqrt{\max(N^2(z), 10^{-7})}$$

- **[LMD\_DDMIX]** (cf Large et al., 1994, eqns (31))

## Schémas pour la couche limite de fond

# Paramétrisation de la couche d'Ekman de fond

[LMD\_BOTEK]

$$h_{\text{Ek}} = \min \left\{ \frac{0.3u_{\star,b}}{|f|}, h \right\}$$

$$\sigma_{k+1/2} = (z_{k+1/2} - h)/h_{\text{Ek}}$$

$$K_{k+1/2}^{\text{Ek}} = \max \{ 4 \kappa u_{\star,b} h_{\text{Ek}} \sigma(1 - \sigma), K_{\min} \}$$

$$\text{AKv}_{k+1/2} = \text{AKv}_{k+1/2} + K_{k+1/2}^{\text{Ek}}$$

$$\text{AKt}_{k+1/2} = \text{AKt}_{k+1/2} + K_{k+1/2}^{\text{Ek}}$$

# Paramétrisation Bottom KPP 1994

## [LMD\_BKPP, HBBL\_SMOOTH]

→ Même principe que pour le KPP de surface mais cette fois-ci on recherche la valeur critique  $Ri_{cr}$  ( $\approx 0.3$ ) en partant du fond

$$h_{bbl} = \min \left( h_{bbl}, \frac{0.7 u_{*,b}}{|f|} \right)$$

$$K_{m,s}(z) = \kappa u_{*,b} h_{bbl} G(\sigma), \quad \sigma = (z-h)/h_{bbl}$$

Schéma de type **GLS** *generic length scale*

# Principe

## [GLS\_MIXING]

$$\begin{aligned}\partial_t e &= \partial_z (K_e \partial_z e) + P + B - \varepsilon, & K_e &= K_M / \text{Sc}_e \\ \partial_t \psi &= \partial_z (K_\psi \partial_z \psi) + \psi e^{-1} (\beta_1 P + \beta_3^\pm B - \beta_2 \varepsilon), & K_\psi &= K_M / \text{Sc}_\psi\end{aligned}$$

avec

$$\psi = (c_\mu^0)^p e^m l^n, \quad P = K_m [(\partial_z u)^2 + (\partial_z v)^2], \quad B = -K_s N^2$$

et

$$\varepsilon = (c_\mu^0)^{3+p/n} e^{3/2+m/n} \psi^{-1/n}, \quad l = (c_\mu^0)^3 e^{3/2} \varepsilon^{-1}$$

$$K_m = \mathbf{c}_\mu (e^2/\varepsilon), \quad K_s = \mathbf{c}_\mu' (e^2/\varepsilon)$$

Une instance de GLS se caractérise par :

- Un choix pour les exposants  $m, n$  et  $p$  (e.g.  $k - \varepsilon, k - \omega, k - kl, \text{gen}$ )
- Une valeur pour les coefficients  $\beta_1, \beta_2$  et  $\beta_3^\pm$
- Une valeur pour les nombres de Schmidt  $\text{Sc}_e$  et  $\text{Sc}_\psi$



## Calcul de $c_\mu$ , $c'_\mu$

$$c_\mu = \frac{n_0 + n_1\alpha_N + n_2\alpha_M}{d_0 + d_1\alpha_N + d_2\alpha_M + d_3\alpha_N\alpha_M + d_4\alpha_N^2 + d_5\alpha_M^2}$$
$$c'_\mu = \frac{n'_0 + n'_1\alpha_N + n'_2\alpha_M}{d_0 + d_1\alpha_N + d_2\alpha_M + d_3\alpha_N\alpha_M + d_4\alpha_N^2 + d_5\alpha_M^2}$$

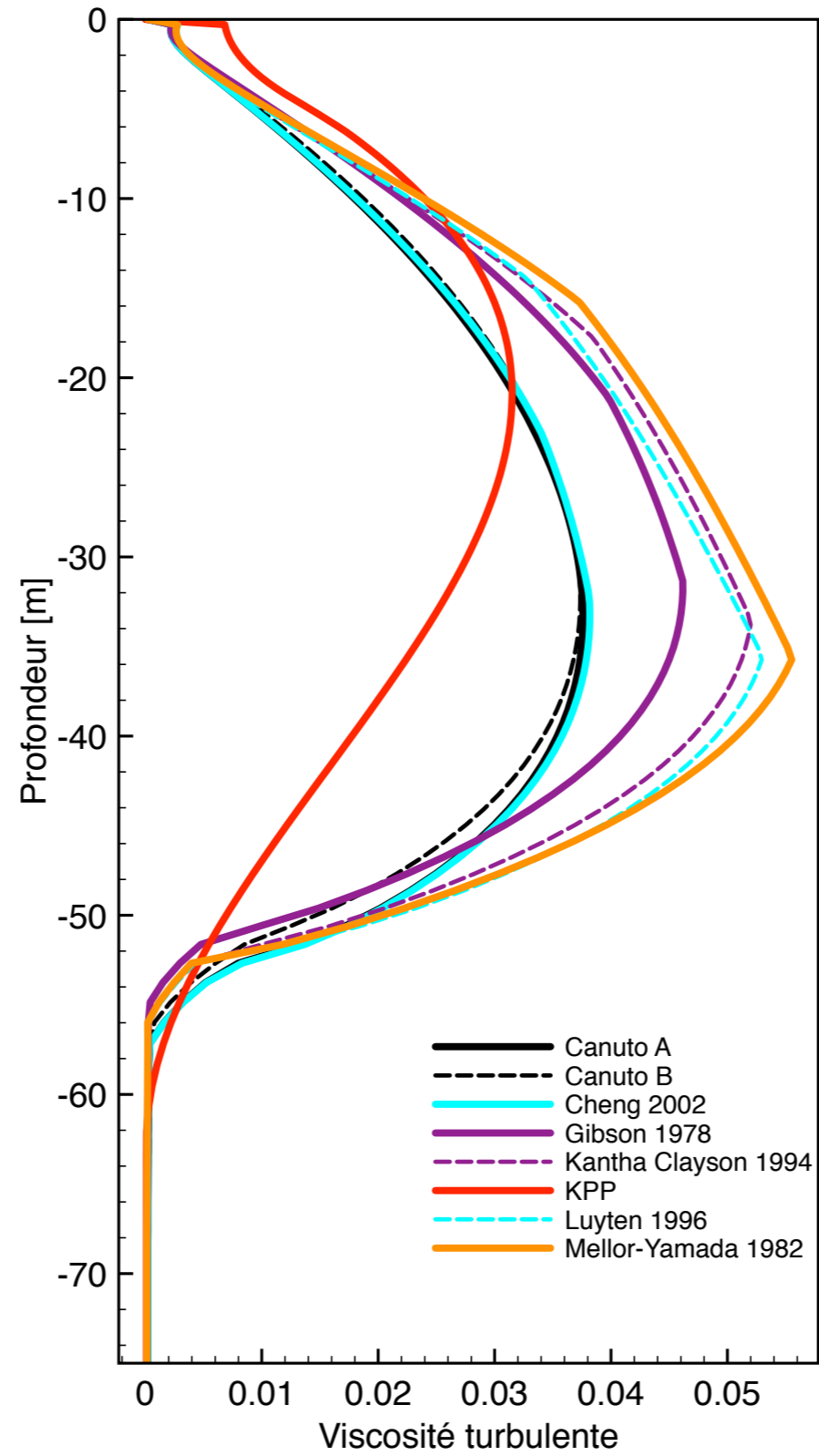
avec

$$\alpha_N = -N^2 \left(\frac{e}{\varepsilon}\right)^2, \quad \alpha_M = [(\partial_z u)^2 + (\partial_z v)^2] \left(\frac{e}{\varepsilon}\right)^2$$

les paramètres  $d_j$ ,  $n_j$  et  $n'_j$  sont propres à chaque fonction de stabilité

- Canuto et al., 2001(A-B);
- Gibson & Launder, 1978;
- Mellor & Yamada, 1982;
- Kantha & Clayson, 1994;
- Luyten, 1996;
- Cheng et al., 2002; ...

# Exemple de sensibilité à la fonction de forme



## Commentaires de conclusion

- KPP pre-suppose que la turbulence de couche limite est en équilibre avec les flux de surface et de fond  
→ hypothèse rigoureusement valide que pour les modèles grande échelle
- Modèles TKE traitent explicitement la haute fréquence temporelle et spatiale dans la couche limite
- Le rôle des termes horizontaux dans l'équation de TKE a été très rarement étudié ...

### Pour des applications côtières

le schéma de fermeture doit

- ① réagir au forçage local et pas seulement aux flux de surface et de fond
- ② réagir avec des temps d'ajustements correctes aux changements rapides de flux de surface et de fond

⇒ Schéma de type GLS théoriquement beaucoup plus justifié que KPP

# RÉSUMÉ

|            |                                     |
|------------|-------------------------------------|
| ANA_VMIX   | Analytical definition               |
| BVF_MIXING | Brunt-Vaisaleafrequency based       |
| LMD_MIXING | K-profile parametrisation           |
| GLS_MIXING | Generic lengthscale parametrisation |

|              |  |
|--------------|--|
| LMD_MIXING   | K-profile parametrisation                  |
| LMD_SKPP     | Activate surface boundary layer KPP mixing |
| LMD_SKPP2005 | Activate surface boundary layer KPP mixing |
| LMD_BKPP     | Activate bottom boundary layer KPP mixing  |
| LMD_BKPP2005 | Activate bottom boundary layer KPP mixing  |
| LMD_RIMIX    | Activate shear instability interior mixing |
| LMD_CONVEC   | Activate convection interior mixing        |
| LMD_DDMIX    | Activate double diffusion interior mixing  |
| LMD_NONLOCAL | Activate nonlocal transport for SKPP       |
| LMD_LANGMUIR | Activate Langmuir turbulence mixing        |

|              |  |
|--------------|--|
| GLS_MIXING   | Activate Generic Length Scale scheme, default is k-epsilon ( |
| GLS_KOMEGA   | Activate K-OMEGA (OMEGA=frequency of TKE dissipation)        |
| GLS_KEPSILON | Activate K-EPSILON (EPSILON=TKE dissipation) as in Jones     |
| GLS_GEN      | Activate generic model of Umlauf and Burchard (2003)         |
| CANUTO_A     | Option for CANUTO A stability function (default, see below)  |
| GibLau_78    | Option for Gibson & Launder, 1978 stability function         |
| MelYam_82    | Option for Mellor & Yamada, 1982 stability function          |
| KanCla_94    | Option for Kantha & Clayson, 1994 stability function         |
| Luyten_96    | Option for Luyten, 1996 stability function                   |
| CANUTO_B     | Option for CANUTO B stability function                       |
| Cheng_02     | Option for Cheng, 2002 stability function                    |