Conséquences physiques des mesures du nombre de Lewis turbulent à partir d'observations (MétéopoleFlux ; Cabauw) et d'une LES (cas IHOP)

Pascal MARQUET, Rachel HONNERT
Météo-France. CNRM-GMAP
William MAUREL
Météo-France. CNRM-GMEI

METEO FRANCE
cnrs UMR 3589

Plan

1 • Turbulence de l’air humide : motivations / Nombre de Lewis ?

2 • Mesures instrumentales : Météopole-Flux / Cabauw

3 • Modèle numérique : LES-IHOP

4 • Résumé - Perspectives

Plan

1 • Turbulence de l'air humide : motivations / Nombre de Lewis ?

2 • Mesures instrumentales : Météopole-Flux / Cabauw

3 • Modèle numérique : LES-IHOP

4 • Résumé - Perspectives

• Taylor (1915) → Richardson (1919)

Atmospheric Stirring Measured by Precipitation.

By LEWIS F. RICHARDSON. Proc. Roy. Soc. London. Vol 96. pp.9-18

The General Equations for Stirring.

In Taylor's theory of atmospheric stirring,* the density of the atmosphere and the stirring coefficient are treated as independent of height.

Under these restrictions he arrives at the equation

$$\boxed{\frac{\partial \chi'}{\partial t} = \mathrm{K}\,\frac{\partial^2 \chi'}{\partial h^2},} \qquad (1)$$

where t is time, h is height, K is the eddy-diffusivity, and χ' may be either the potential temperature, or the vapour pressure, or the horizontal velocity in a fixed azimuth.

The present paper deals with a range of height involving considerable variations of density and very large variations in the stirring, so that it is necessary to find an equation more general than (1). At the same time, it will be convenient to arrange to have a simple expression not only for $\partial\chi'/\partial t$, but also for the vertical flux.

Here we may usefully bear in mind the analogy with the conduction of heat in a solid. The total water in a portion of air, or the total entropy in it, are not altered by gently mixing it; and the same is true of its horizontal momentum in a fixed azimuth,

* 'Phil. Trans.,' A, vol. 215, p. 3 (1915).

Mélanges turbulents de l'air humide pour :

- l'**eau totale** → q_t
- l'**entropie** → s (θ_s)
- le **vent horizontal** → (u, v)

$$\boxed{\frac{\partial \chi}{\partial t} = \frac{\partial}{\rho\,\partial h}\left(c\,\frac{\partial \chi}{\partial h}\right) = -g\,\frac{\partial}{\partial p}\left(c\,\frac{\partial \chi}{\partial h}\right)}$$

$$dp = -g\rho\, dh.$$

METEO FRANCE

cnrs UMR 3589

• Turbulence humide : utilisation de θ_s ?

On pose en général :

$$\overline{w'\theta_l'} \approx -K_h \, \partial\overline{\theta}_l / \partial z$$
$$\overline{w'q_t'} \approx -K_w \, \partial\overline{q}_t / \partial z$$

$$K_h = K_w$$

$Le_t = K_h / K_w = 1$

Nombre de Lewis

• Turbulence humide : utilisation de θ_s ?

On pose en général :

$$\overline{w'\theta_l'} \approx -K_h \,\partial\overline{\theta}_l / \partial z$$
$$\overline{w' q_t'} \approx -K_w \,\partial\overline{q}_t / \partial z$$

$$K_h = K_w$$

$\mathrm{Le}_t = K_h / K_w = 1$

Nombre de Lewis

Et pourtant, l'entropie vaut : $s = s_{ref} + c_{pd} \ln(\theta_s)$

Marquet (2011, 1er ordre) : $\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda\, q_t)$ $(\Lambda \approx 6)$

donc, Richardson voudrait : $\overline{w'\theta_s'} \approx -K_s \,\partial\overline{\theta}_s / \partial z$

METEO FRANCE

CNRS UMR 3589

• Turbulence humide : utilisation de θ_s ?

On pose en général :

$$\overline{w'\theta_l'} \approx -K_h \, \partial\overline{\theta}_l / \partial z$$
$$\overline{w'q_t'} \approx -K_w \, \partial\overline{q}_t / \partial z$$

$$K_h = K_w$$

$Le_t = K_h / K_w = 1$

Nombre de Lewis

Et pourtant, l'entropie vaut : $s = s_{ref} + c_{pd} \ln(\theta_s)$

Marquet (2011, 1er ordre) : $\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda q_t)$ $\quad (\Lambda \approx 6)$

donc, Richardson voudrait : $\overline{w'\theta_s'} \approx -K_s \, \partial\overline{\theta}_s / \partial z$

Gradients : $$\frac{\partial\overline{\theta}_s}{\partial z} \approx \exp(\Lambda \, \overline{q}_t) \, \frac{\partial\overline{\theta}_l}{\partial z} + \Lambda \, \overline{\theta}_s \, \frac{\partial\overline{q}_t}{\partial z}$$

Flux verticaux : $$\overline{w'\theta_s'} \approx \exp(\Lambda \, \overline{q}_t) \, \overline{w'\theta_l'} + \Lambda \, \overline{\theta}_s \, \overline{w'q_t'}$$

• Turbulence humide : utilisation de θ_s ?

$$s = s_{ref} + c_{pd} \ln(\theta_s)$$

$$\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda \, q_t)$$

$$(\Lambda \approx 6)$$

$$\overline{w'\theta_s'} \approx -K_s \, \partial\overline{\theta}_s / \partial z$$

← **quelles** →
différences ?

$$\overline{w'\theta_l'} \approx -K_h \, \partial\overline{\theta}_l / \partial z$$

$$\overline{w'q_t'} \approx -K_w \, \partial\overline{q}_t / \partial z$$

METEO FRANCE

CNRS UMR 3589

• Turbulence humide : utilisation de θ_s ?

$$s = s_{ref} + c_{pd} \ln(\theta_s)$$

$$\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda\, q_t)$$ $$(\Lambda \approx 6)$$

$$\overline{w'\theta_s'} \approx -K_s\, \partial\bar{\theta}_s/\partial z$$

← quelles →
différences ?

$$\overline{w'\theta_l'} \approx -K_h\, \partial\bar{\theta}_l/\partial z$$
$$\overline{w'q_t'} \approx -K_w\, \partial\bar{q}_t/\partial z$$

On obtient au final : $$\overline{w'\theta_l'} \approx -K_s \frac{\partial\bar{\theta}_l}{\partial z} - (K_s - K_w)\,\Lambda\,\bar{\theta}_l \frac{\partial\bar{q}_t}{\partial z}$$

à comparer avec : $$\overline{w'\theta_l'} \approx -K_h \frac{\partial\bar{\theta}_l}{\partial z}$$

"sur/contre ↑ gradient" ?
si $K_s \neq K_w$

semblables ssi : $K_s = K_h$ $K_s = K_w$

QUESTION :

→ **$Le_{ts} = K_s / K_w = 1$?**

Nombre de Lewis

METEO FRANCE

cnrs UMR 3589

Plan

1. • Turbulence de l'air humide : motivations / Nombre de Lewis ?
2. • Mesures instrumentales : Météopole-Flux / Cabauw
3. • Modèle numérique : LES-IHOP
4. • Résumé - Perspectives

METEO FRANCE

cnrs UMR 3589

P. Marquet (GMAP) & W. Maurel (GMEI) / DEPHY2 2016

Anémomètre sonique Gill

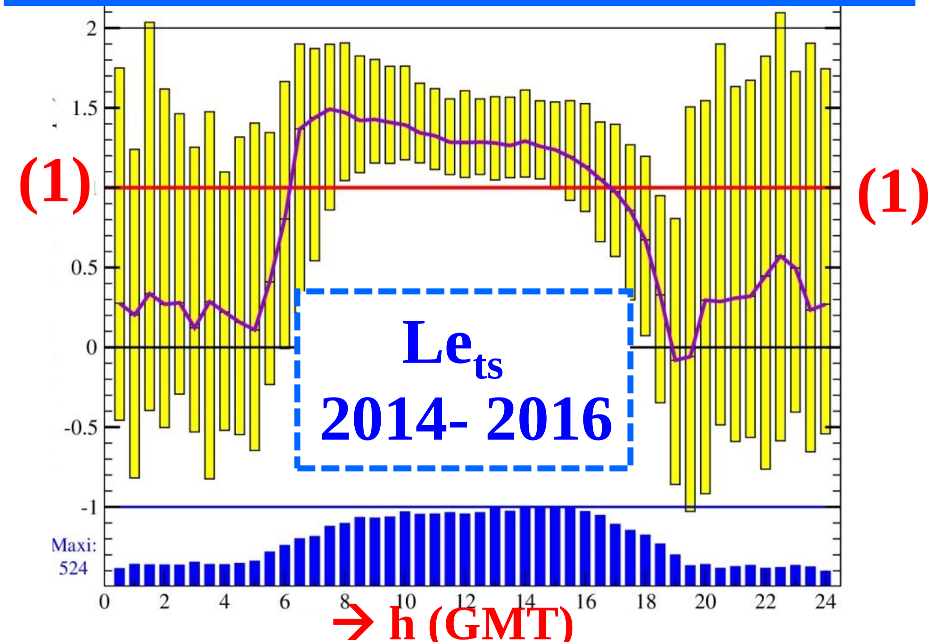
(u', v', w', $T'_{sonique}$)

Analyseur rapide Licor-7500

(c'_{CO2}, q'_{V})

Météopole-Flux
CNRM/GMEI

Météopole-Flux CNRM/GMEI

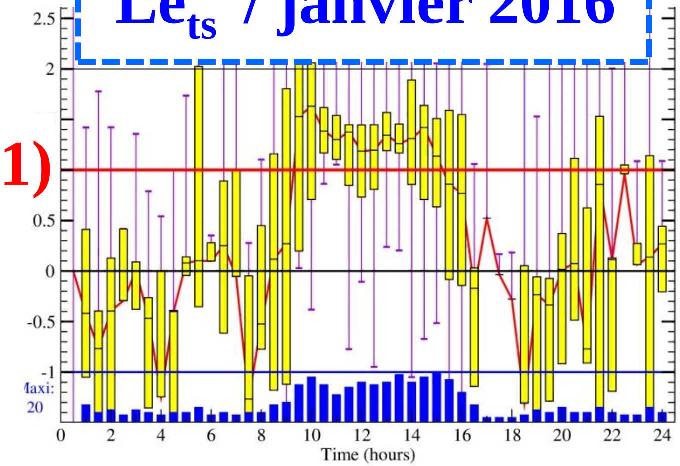


- On a : < 1 la nuit ; maxi le matin ; décroissance diurne ?

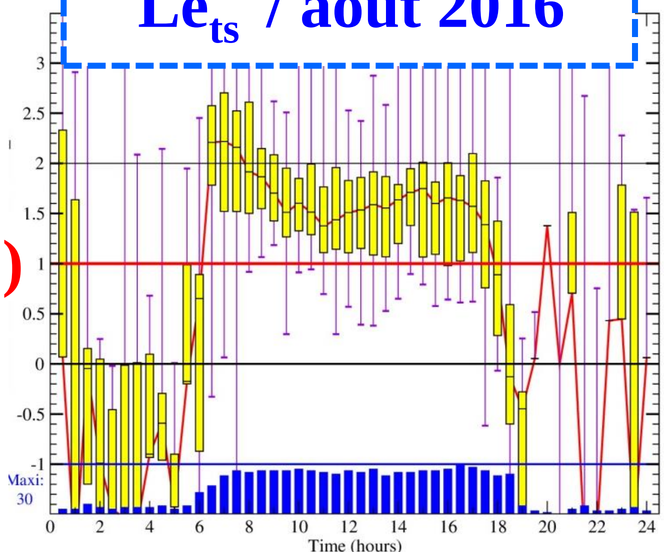
P. Marquet (GMAP) & W. Maurel (GMEI) / DEPHY2 2016

Météopole-Flux CNRM/GMEI

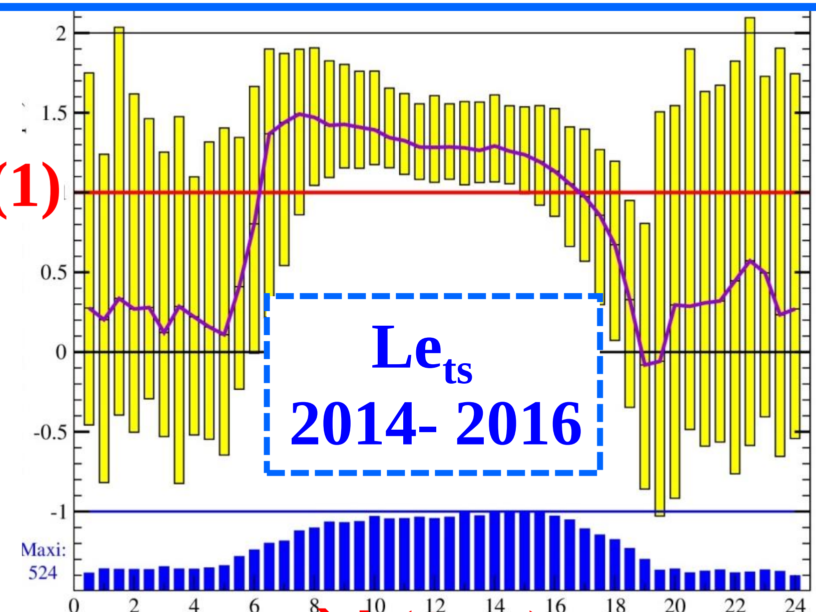
Le$_{ts}$ / janvier 2016

(1)  (1)

Le$_{ts}$ / août 2016

(1)  (1)

→ h (GMT)

(1)  (1)

→ h (GMT)

- On a : < 1 la nuit ; maxi le matin ; décroissance diurne ?

- disparités mensuelles pour Le$_{ts}$

P. Marquet & F. Bosveld (KNMI) 2013-2016

Cabauw masts / KNMI

(213 m + 2 x 20 m)

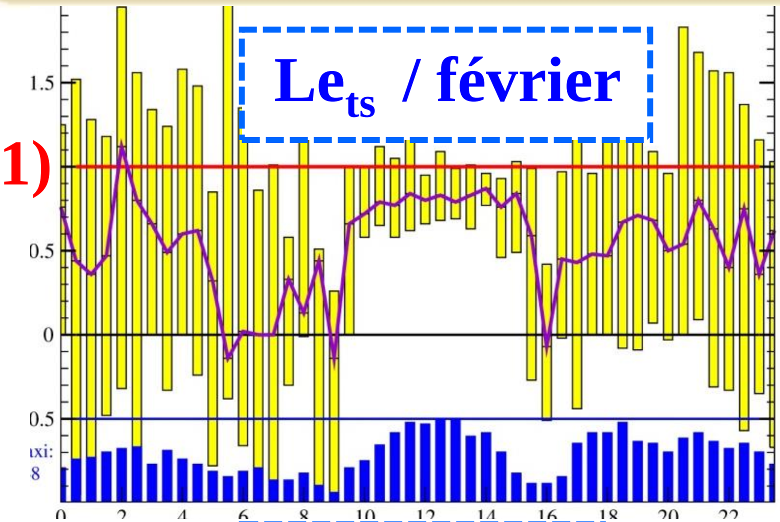
METEO FRANCE

CNRS UMR 3589

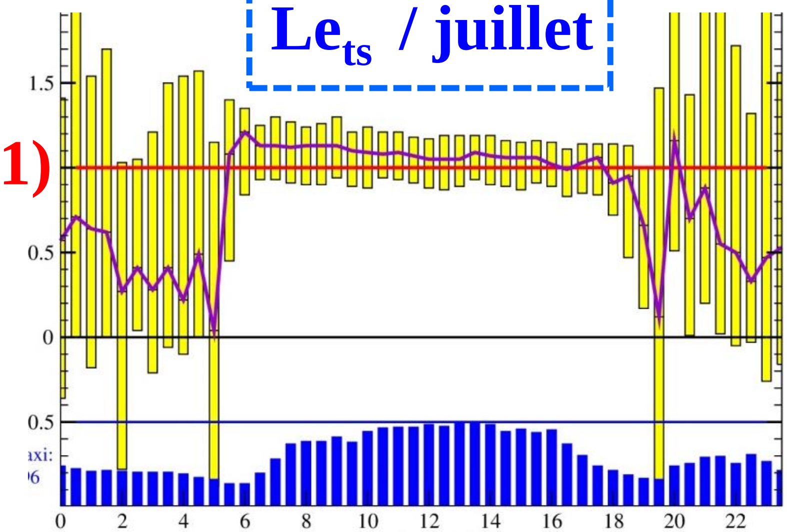
P. Marquet & F. Bosveld (KNMI) 2013-2016

Cabauw masts / KNM

Le_{ts} / février

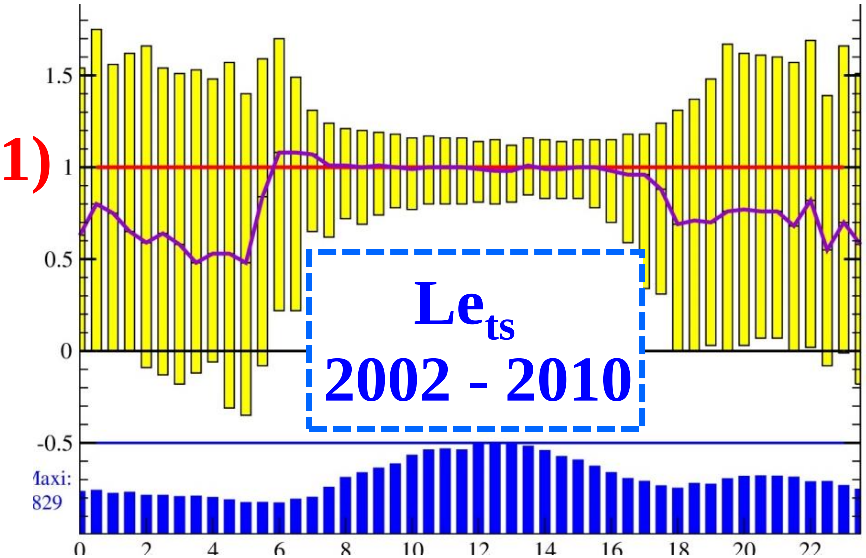


Le_{ts} / juillet



→ h (GMT)

Le_{ts} 2002 - 2010



→ h (GMT)

- On a : < 1 la nuit ; maxi le matin ; décroissance diurne ?

- disparités mensuelles pour Le_{ts}

Comment aller plus loin : calculs du Nombre Le_{ts} ?

Richardson (1919)

$$\overline{w'\theta_s'} = -K_s \frac{\partial \overline{\theta}_s}{\partial z}$$

$$\overline{w'q_t'} = -K_w \frac{\partial \overline{q}_t}{\partial z}$$

Marquet (2011)

$$\overline{w'\theta_l'} = -K_w \left[\boxed{(Le_{ts})} \frac{\partial \overline{\theta}_l}{\partial z} + \boxed{(Le_{ts} - 1)} \Lambda \, \overline{\theta}_l \frac{\partial \overline{q}_t}{\partial z} \right]$$

$$\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda \, q_t)$$

$$\boxed{Le_{ts} = K_s / K_w} \quad (= Sc / \mathrm{Pr})$$

Comment aller plus loin : calculs du Nombre Le_{ts} ?

Richardson (1919)

$$\overline{w'\theta_s'} = -K_s \frac{\partial \overline{\theta}_s}{\partial z}$$

$$\overline{w'q_t'} = -K_w \frac{\partial \overline{q}_t}{\partial z}$$

Marquet (2011)

$$\theta_s \approx \theta_l \exp\left(\Lambda\, q_t\right)$$

$$\overline{w'\theta_l'} = -K_w \left[\boxed{(Le_{ts})} \frac{\partial \overline{\theta}_l}{\partial z} + \boxed{(Le_{ts} - 1)} \, \Lambda\, \overline{\theta}_l \frac{\partial \overline{q}_t}{\partial z} \right]$$

$$\boxed{Le_{ts} = K_s / K_w} \quad (= Sc / \Pr)$$

---

si vraiment **Le_{ts}** $\neq$ **1** en fait il faut revisiter "CBR" : revenir à Sommeria (1976) et RS81 ...

$$\boxed{Le_{ts} = \frac{A + A_\varepsilon \boxed{Y_s} + A_\varepsilon\,(2\,B_\varepsilon - 1)\boxed{Y_q}}{1 + (2 - A_\varepsilon)\boxed{Y_s} + A_\varepsilon \boxed{Y_q}}}$$

Comment aller plus loin : calculs du Nombre Le_{ts} ?

Richardson (1919)

$$\overline{w'\theta_s'} = -K_s \frac{\partial \overline{\theta}_s}{\partial z}$$

$$\overline{w'q_t'} = -K_w \frac{\partial \overline{q}_t}{\partial z}$$

Marquet (2011)

$$\overline{w'\theta_l'} = -K_w \left[(Le_{ts}) \frac{\partial \overline{\theta}_l}{\partial z} + (Le_{ts} - 1)\, \Lambda\, \overline{\theta}_l \frac{\partial \overline{q}_t}{\partial z} \right]$$

$$\theta_s \approx \theta_l \exp\left(\Lambda\, q_t \right)$$

$$Le_{ts} = K_s / K_w \quad (= Sc / \mathrm{Pr})$$

si vraiment **$Le_{ts} \neq 1$** *en fait il faut revisiter "CBR" : revenir à Sommeria (1976) et RS81 ...*

$$Le_{ts} = \frac{A + A_\varepsilon \boxed{Y_s} + A_\varepsilon\,(2\,B_\varepsilon - 1)\boxed{Y_q}}{1 + (2 - A_\varepsilon)\boxed{Y_s} + A_\varepsilon \boxed{Y_q}}$$

3 constantes ($A \;\; A_\varepsilon \;\; B_\varepsilon$) plus 2 variables clefs →
(≈ nombres de Redels.)

$$Y_s \propto \frac{L^2}{e} \frac{\partial \theta_s}{\partial z} \qquad Y_q \propto \frac{L^2}{e} \frac{\partial q_t}{\partial z}$$

METEO FRANCE — CNRS UMR 3589

Comparaison théorie / observations ?

Météopole-Flux: juin 2016

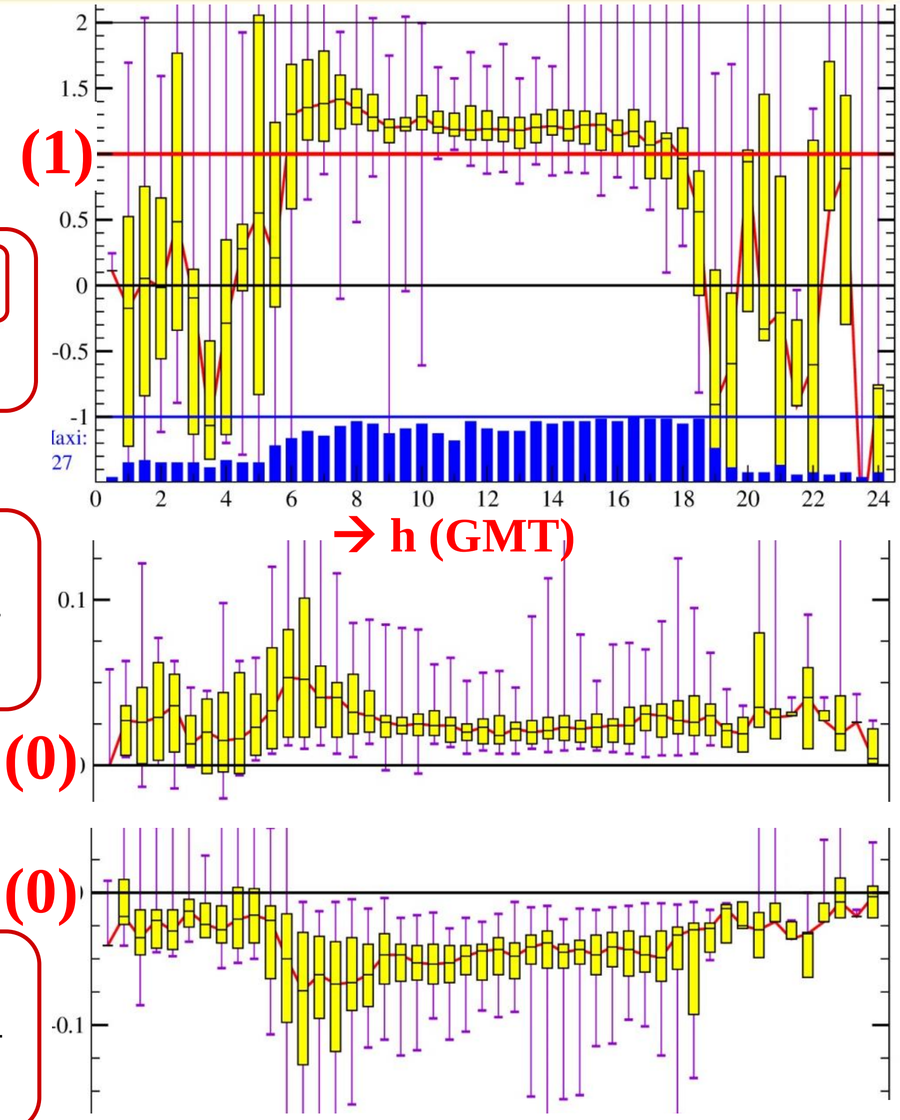
$$Le_{ts} = \frac{A + A_\varepsilon \boxed{Y_s} + A_\varepsilon\,(2\,B_\varepsilon - 1)\boxed{Y_q}}{1 + (2 - A_\varepsilon)\boxed{Y_s} + A_\varepsilon \boxed{Y_q}}$$

e : fourni par eddy-correl.

$$Y_s \propto \frac{L^2}{e}\,\frac{\partial \theta_s}{\partial z}$$

L $\approx$ R.M.C.-2001
(*mais sans "H_{CLP}"*...)

$$Y_q \propto \frac{L^2}{e}\,\frac{\partial q_t}{\partial z}$$



Comparaison théorie / observations ?

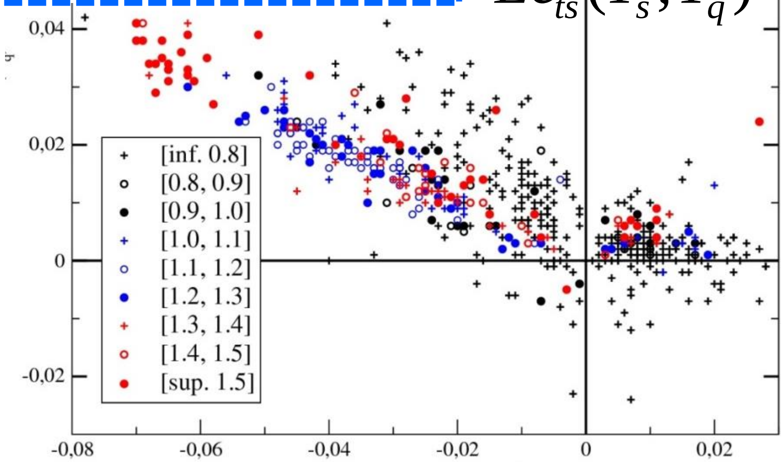
Météopole-Flux : 2014 à 2016

$$Le_{ts} = \frac{A + A_\varepsilon \boxed{Y_s} + A_\varepsilon\,(2\,B_\varepsilon - 1)\boxed{Y_q}}{1 + (2 - A_\varepsilon)\boxed{Y_s} + A_\varepsilon \boxed{Y_q}}$$

(moyennes mensuelles)

$Le_{ts}(Y_s, Y_q)$

Y_q

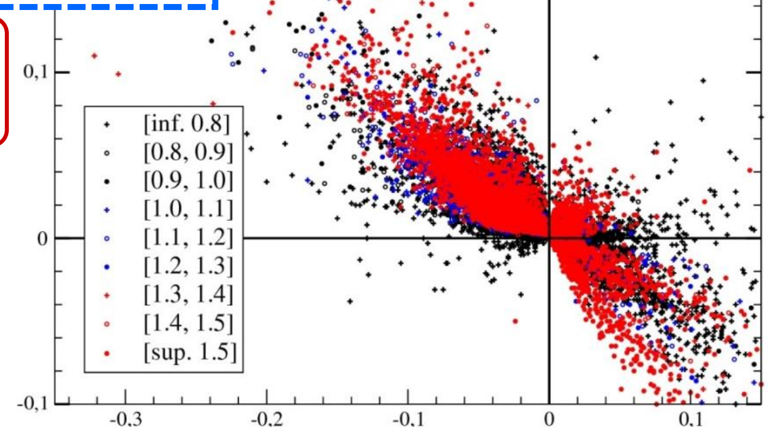


Y_s

(toutes)

$Le_{ts}(Y_s, Y_q)$

Y_q



Y_s

… décevant : calculs de « *L* » et « *e* » ?

→ autre possibilité : étude des LES ?

$$Y_X \propto \frac{L^2}{e}\,\frac{\partial X}{\partial z}$$

Plan

METEO FRANCE

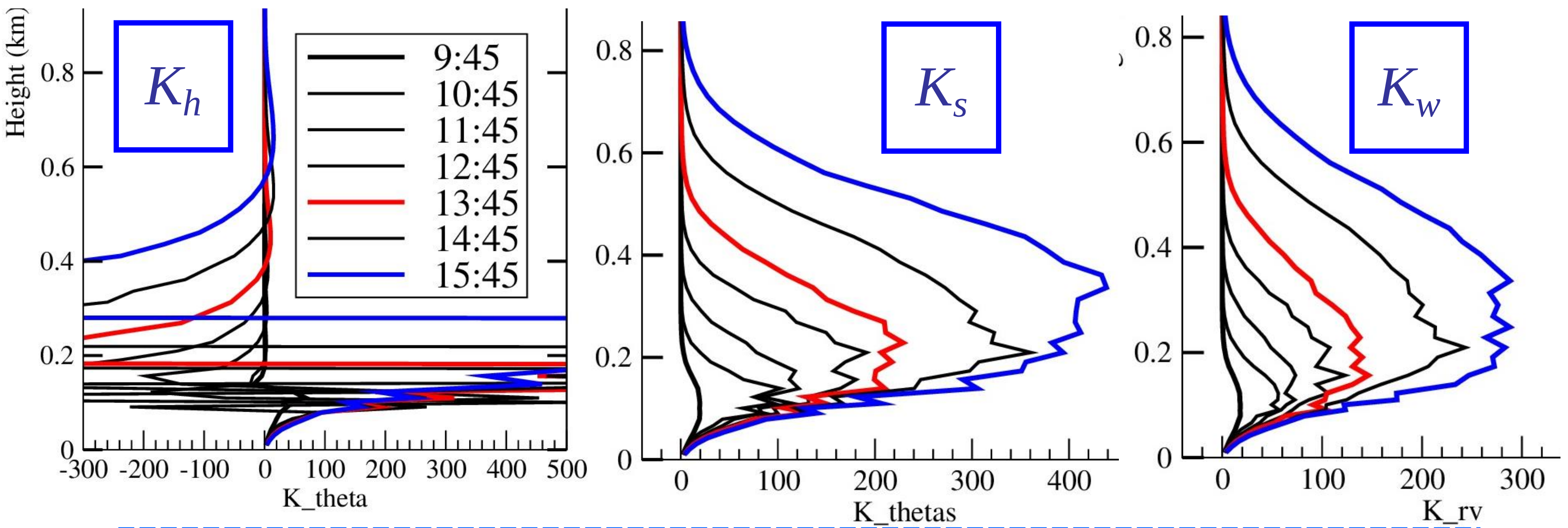
cnrs UMR 3589

LES du cas IHOP (ARM-USA-2002) / $q_v \neq 0$ / $q_l = q_i = 0$

Couvreux *et al.* (2005) / R. Honnert 2016

LES du cas IHOP (ARM-USA-2002) / $q_v \neq 0$ / $q_l = q_i = 0$

Couvreux *et al.* (2005) / R. Honnert 2016



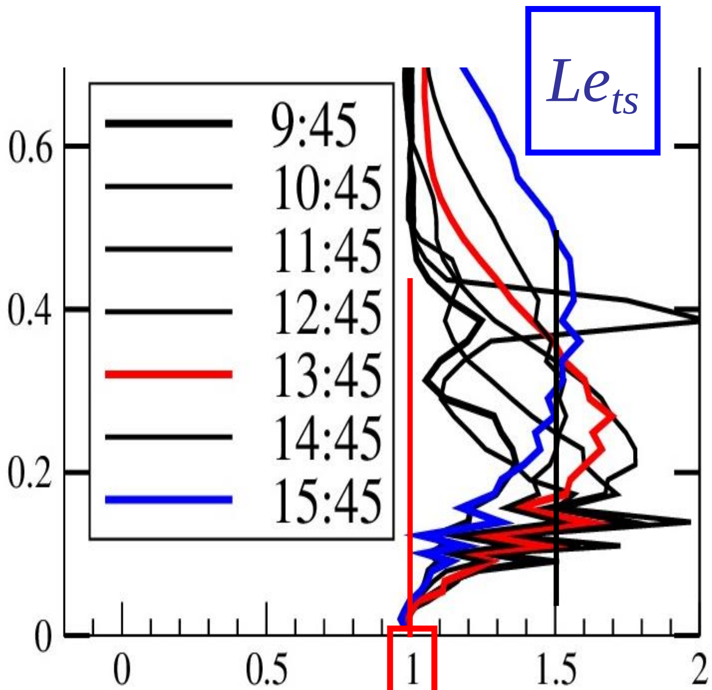
Calculs de K_h instables : contre-gradients avec θ …

Calculs de K_s partout possibles : θ_s = OK !

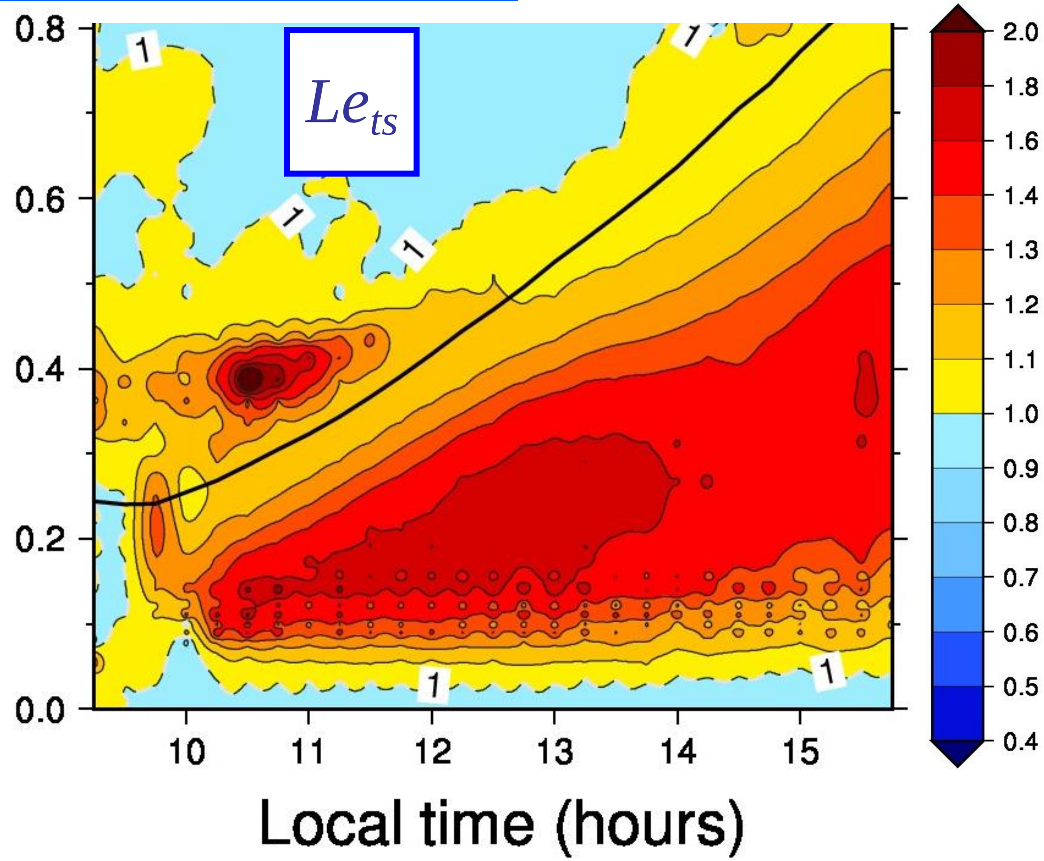
On peut donc calculer : $Le_{ts} = K_s / K_w$ (…/…)

LES du cas IHOP (ARM-USA-2002) / $q_v \neq 0$ / $q_l = q_i = 0$

Couvreux *et al.* (2005) / R. Honnert 2016



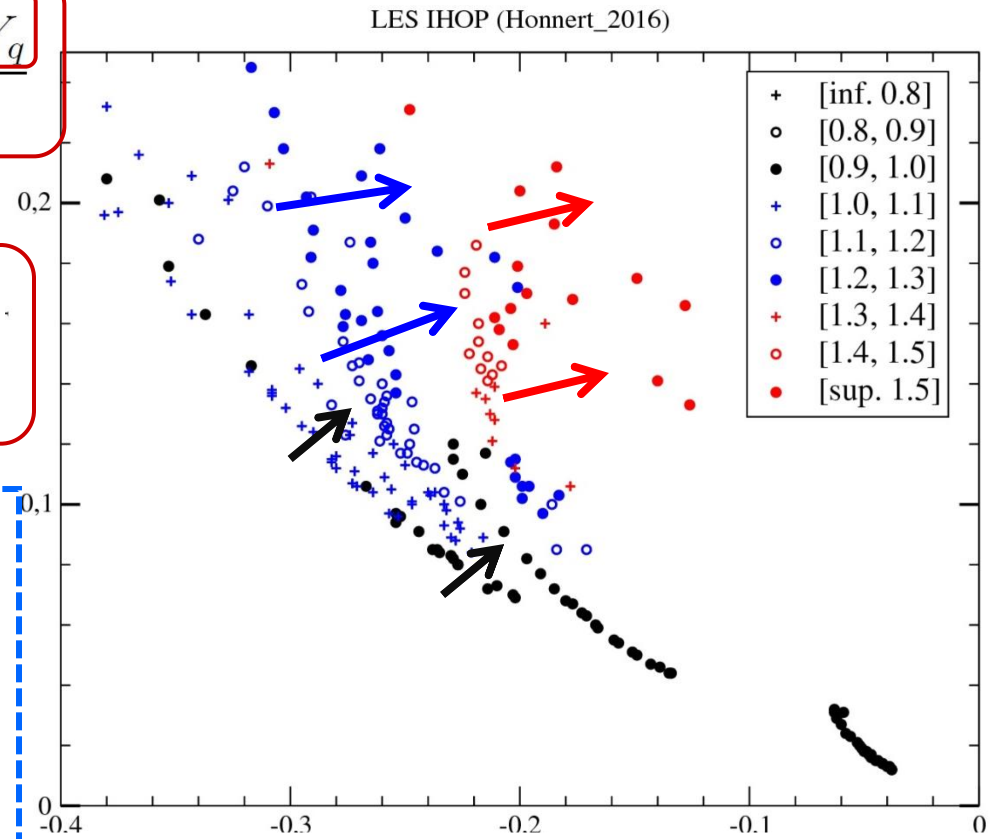
Marquet / Honnert (2016)



LES du cas IHOP (ARM-USA-2002) / $q_v \neq 0$ / $q_l = q_i = 0$

$$Le_{ts} = \frac{A + A_\varepsilon \boxed{Y_s} + A_\varepsilon\,(2\,B_\varepsilon - 1)\boxed{Y_q}}{1 + (2 - A_\varepsilon)\boxed{Y_s} + A_\varepsilon \boxed{Y_q}}$$

$$Y_q \propto \frac{L^2}{e}\,\frac{\partial q_t}{\partial z}$$



encourageant : calculs de « *L* » et « *e* » plus robustes ? → chercher les 3 constantes (A A_ε B_ε) ?

$$Y_s \propto \frac{L^2}{e}\,\frac{\partial \theta_s}{\partial z}$$

Plan

1 • Turbulence de l'air humide : motivations / Nombre de Lewis ?

2 • Mesures instrumentales : Météopole-Flux / Cabauw

3 • Modèle numérique : LES-IHOP

4 • Résumé - Perspectives

Conclusions - Perspectives

- Travaux DEPHY2 → ANR « HIGTUNE » (Fleur Couvreux)

  → Richardson (1919) / Marquet (2011) : turbulence sur θ_s

  → paramétrisation de $\mathbf{Le}_{ts}$ en fonction de Υ_s et Υ_q

Conclusions - Perspectives

- Travaux DEPHY2 → ANR « HIGTUNE » (Fleur Couvreux)

  → Richardson (1919) / Marquet (2011) : turbulence sur θ_s

  → paramétrisation de $\mathbf{Le}_{ts}$ en fonction de Y_s et Y_q

- Valider les calculs théoriques de $\mathbf{Le}_{ts}\,(Y_s\,, Y_q)$

- Pbs mesures de *"L"* via *"H_{CLP}"* dans les observations ?

- Dans les LES : séparer les flux turbulents des thermiques (traceurs + balayer les LES de HIGH-TUNE…)

Merci – Questions ?