AMA-2012 - Toulouse, 23 janvier 2012

Sur l'utilisation de l'entropie humide dans les paramétrisations de la turbulence.

Pascal MARQUET
(Météo-France. DPrévi / LABO)
Jean-François Geleyn
(Météo-France. CNRM)

METEO FRANCE

Plan de l'exposé

1) Motivations : pourquoi s'intéresser à l'entropie ? (humide)

2) Comment calculer l'entropie (humide) ? $s = Cste + c_{pd} \ln(\theta_s)$

3) Applications : Strato-cumulus … → Turbulence ?

4) Turbulence : variables conservatives (θ_s, q_t) et $\boxed{N^2}$?

5) Conclusions – Perspectives → exposé de J-F. Geleyn …

Plan de l'exposé

1) Motivations : pourquoi s'intéresser à l'entropie ? (humide)

2) Comment calculer l'entropie (humide) ? $s = Cste + c_{pd} \ln(\theta_s)$

3) Applications : Strato-cumulus … → Turbulence ?

4) Turbulence : variables conservatives (θ_s , q_t) et $\boxed{N^2}$?

5) Conclusions – Perspectives → exposé de J-F. Geleyn …

Conclusions / Perspectives … en juin 2010 (CNRM)

Turbulence **:** $P_\theta = (g/\theta)\langle w'\theta_v'\rangle$; *relier* $\langle w's'\rangle$ *avec* $\langle w'\,\theta_l'\rangle$ *et* $\langle w'\,q_t'\rangle$ *aussi* $(N^2)_{moist}$ *et/ou* R_i *? …*

$(PV)_{moist}$

Q.G

Sc → Cu ? « adiab./revers. »

S — ***Entropie*** /

$\Delta H - T_r\ \Delta S$ — $T_r\ (\Delta S)_{tot}$

Bilan entropique
Système-Terre *?*
O+Atm.+…+ ***Rayt*** *!*

Sondages & Emagrammes

Setup + Valid : LES / SCM ?

APE & CAPE & Convection

Norme & $(SV)_{moist}$

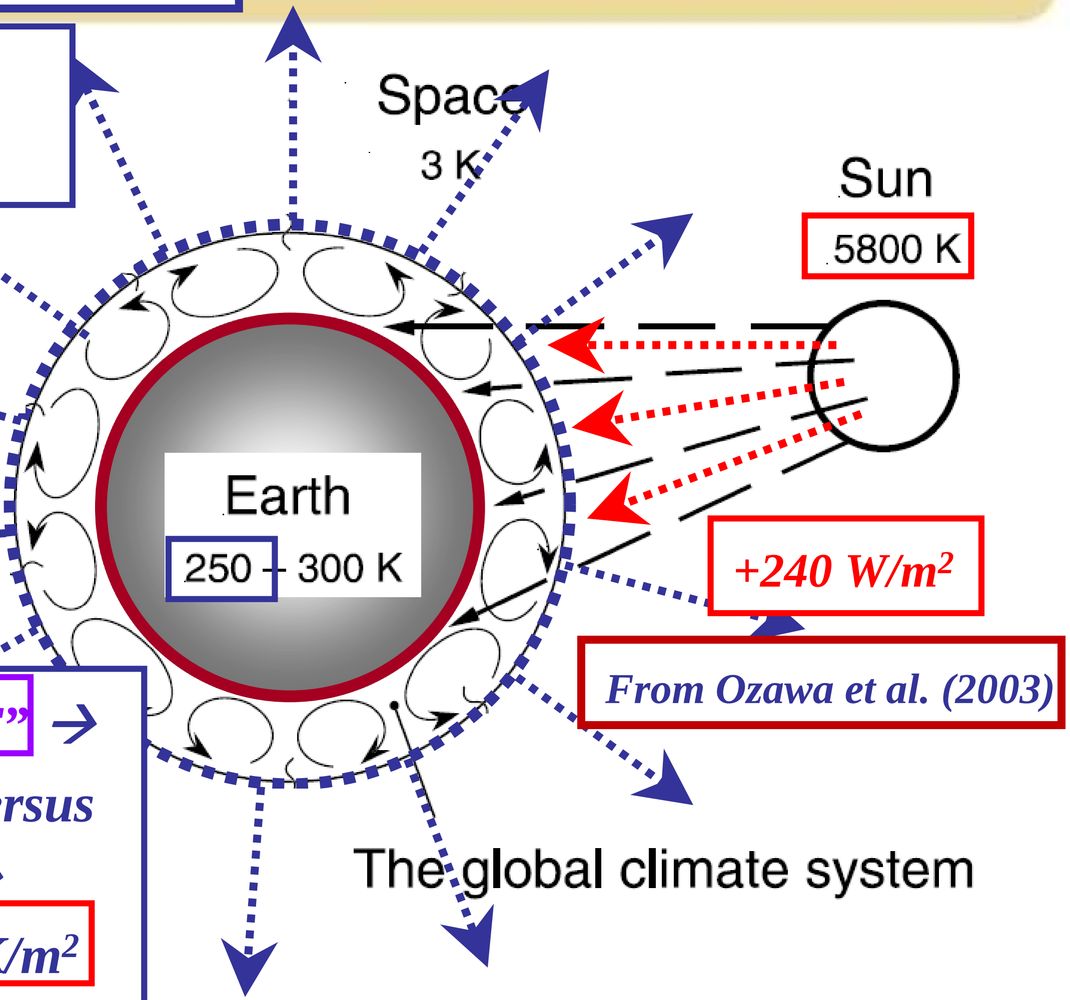
Motivations : pourquoi « s » ?

Grands équilibres pour la Terre ?

1) <u>Budget fermé en énergie</u> (ou enthalpie) : F = +/- 240 W/m²

–240 W/m²

→ un monitoring de ces 2 budgets ?



2) <u>Déséquilibre en entropie</u> : "F/T" →

$-240/\boxed{250} = -940\ mW/K/m^2$ versus

$+\ 240/\boxed{5800} = +40\ mW/K/m^2$ →

<u>production nette</u> de $\boxed{900\ mW/K/m^2}$

par Atm. / Surf. / Oceans / …

Bilan global de l'entropie : sources / puits ?

Climate entropy budget of the HadCM3 atmosphere–ocean general circulation model and of FAMOUS, its low-resolution version

Salvatore Pascale · Jonathan M. Gregory · Maarten Ambaum · Rémi Tailleux

Clim Dyn © Springer-Verlag 2009
DOI 10.1007/s00382-009-0718-1

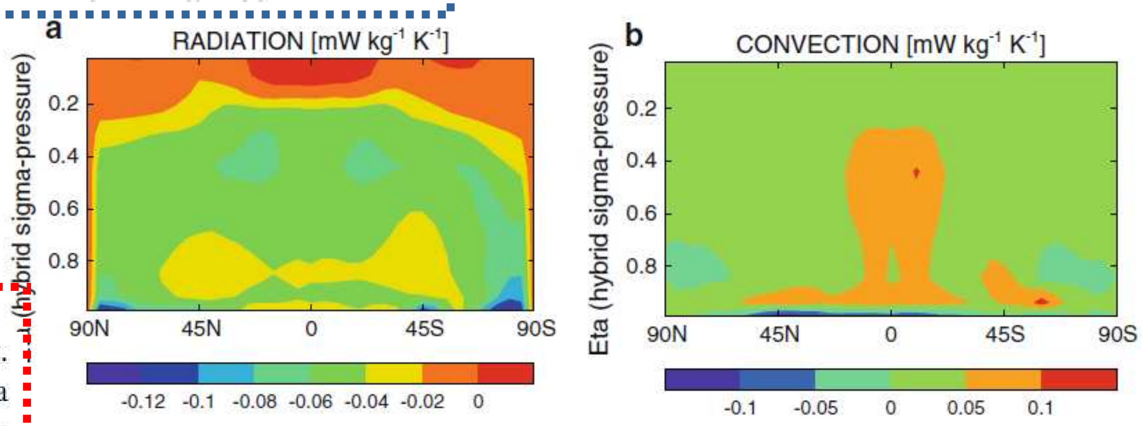


Fig. 1 Fifty year zonal means of the specific entropy sources $\dot{s}_{rad}, \dot{s}_{conv}, \dot{s}_{ls}, \dot{s}_{bl}, \dot{s}_{diff}$ and $\dot{s}_{encor}$ (mW kg^{-1}K^{-1}) within the atmosphere from FAMOUS

the formulation of the model has an important influence on the climate entropy budget. Since this is the first diagnosis of the entropy budget in a climate model of the type and complexity used for projection of twenty-first century climate change, it would be valuable if similar analyses were carried out for other such models.

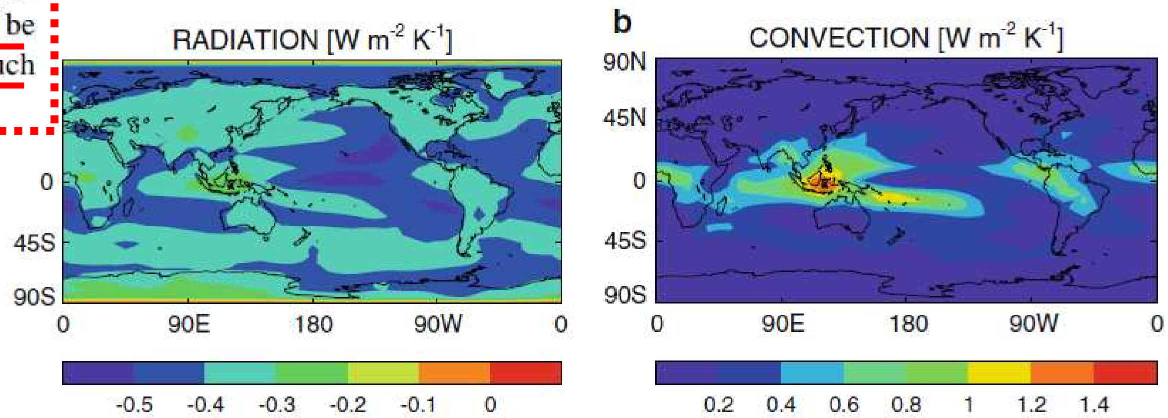


Fig. 2 Fifty year mean of the mass weighted vertical integrals of the entropy sources $\dot{s}_{rad}, \dot{s}_{conv}, \dot{s}_{ls}, \dot{s}_{bl}, \dot{s}_{diff}$ and $\dot{s}_{encor}$ (W m^{-2}K^{-1}) from FAMOUS

+ HadCM3
+ océans …

METEO FRANCE

Entropie d'un gaz parfait

Entropie : $$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

Equation d'état : $$p = \rho R T$$

$c_p(T)$ constant : $$S = S_0 + c_p \ln(T/T_0) - R \ln(p/p_0)$$

$$S = S_{ref} + c_p \ln(\theta)$$

$$S_{ref} = S_0 - c_p \ln(T_0)$$

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p}$$

Entropie d'un gaz parfait

Equation d'état :

$$p = \rho R T$$

Entropie :

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

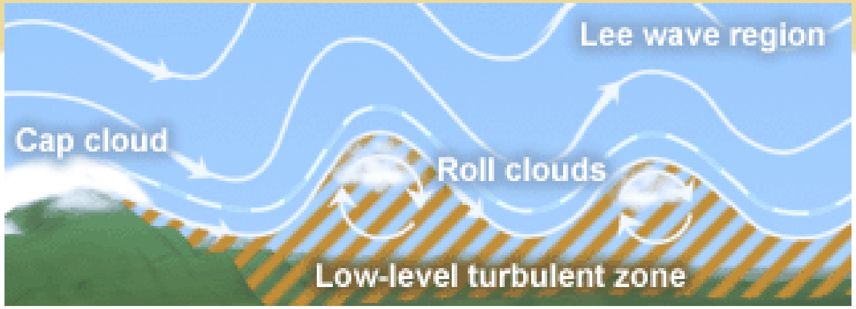
$c_p(T)$ constant :

$$S = S_{ref} + c_p \ln(\theta)$$

$$\theta = T\left(\frac{p_0}{p}\right)^{R/c_p}$$

Si adiab. rev. = isentrope

Fréquence Brunt-Väisälä ?



$$N^2 = \left(\frac{g}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)_{part} - \left(\frac{g}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)_{env}$$

$$N^2 \approx \left(\frac{g}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)_{env} - \cancel{\left[\left(\frac{g}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)_{part}\right]}$$

Plan de l'exposé

1) <u>Motivations</u> : pourquoi s'intéresser à l'entropie ? (humide)

2) <u>Comment calculer</u> l'entropie (humide) ? $\boxed{s = Cste + c_{pd} \ln(\theta_s)}$

3) <u>Applications</u> : Strato-cumulus … → $\boxed{\text{Turbulence ?}}$

4) <u>Turbulence</u> : variables conservatives $\boxed{(\theta_s, q_t)}$ et $\boxed{N^2}$?

5) <u>Conclusions</u> – <u>Perspectives</u> → <u>exposé de J-F. Geleyn</u> …

Entropie d'un gaz parfait : généralisations humides ?

Equation d'état : $$p = \rho R T$$

Entropie : $$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

$c_p(T)$ constant :

$$S = S_{ref} + c_p \ln(\theta)$$

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p}$$

Fréq. Brunt-Väisälä ?

→ flottabilité : θ_v

+ nouvelles températures potentielles humides ?

θ_{DK82} θ_{E94}

METEO FRANCE

L'entropie « s » ←→ θ_l ou θ_E ?

Betts (1973) / θ_l :

$$\boxed{0 = \frac{ds}{1+r_t} \approx c_{pd}\,\frac{d\theta_l}{\theta_l} \approx c_{pd}\,\frac{d\theta}{\theta} - \frac{L_v(T)}{T}\,dq_l,}$$

et si $dq_t = 0$:

$$\boxed{0 = \frac{ds}{1+r_t} \approx c_{pd}\,\frac{d\theta_{ES}}{\theta_{ES}} \approx c_{pd}\,\frac{d\theta}{\theta} + \frac{L_v(T)}{T}\,dq_S.}$$

Conclusions **:**

1) θ_l certes « conservatif » (i.e. conservé si adiab. réserv. fermé) : mais termes $\boxed{ds/(1+r_t)}$ et $\boxed{dq_t = 0}$ et $\boxed{L_{vap}(T)/T = Cste}$ … ??
2) Donc : ni θ_l ni θ_E ne sont une mesure de l'entropie !
3) Donc : recherche de la formulation de l'entropie (humide) …

Calculs de $s \rightarrow \theta_S \rightarrow (\theta_S)_1$ (1/3)

Definition of a moist entropy potential temperature: application to FIRE-I data flights

Pascal Marquet
Météo-France, DPrévi/Labo, Toulouse, France

Q. J. R. Meteorol. Soc. 137: 768–791, April 2011 A

Entropie = fonction d'état → calculable en tout point: $s = q_d\, s_d + q_v\, s_v + q_l\, s_l + q_i\, s_i$

Hauf & Höller (1987)

$$q_d \quad s_d = (s_d)_r + c_{pd} \ln(T/T_r) - R_d \ln[\, p/(p_d)_r \,]$$
$$q_v \quad s_v = (s_v)_r + c_{pv} \ln(T/T_r) - R_v \ln[\, e/e_r \,]$$
$$q_l \quad s_l = (s_l)_r + c_l \ln(T/T_r)$$
$$q_i \quad s_i = (s_i)_r + c_i \ln(T/T_r)$$

Le but :

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

$$s_{ref} = \text{Cste} \qquad s \leftrightarrow \theta_s\,?$$

Les constantes deviennent "actives" !
(dépendantes de q_d , q_v , …)

Calculs de s → θ_s → $(\theta_s)_1$ (2/3)

MOIST ENTROPIC POTENTIAL TEMPERATURE

$\forall\ (T_r, p_r, r_r)$!

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

$$s_{ref} \approx 1138.56\ \mathrm{J\,K^{-1}\,kg^{-1}}$$

$$\theta_s \equiv \theta\,\exp(\Lambda\,q_t)\,\exp\left(-\frac{L_v\,q_l + L_s\,q_i}{c_{pd}\,T}\right) \times \left(\frac{T}{T_r}\right)^{\lambda\,q_t}\left(\frac{p}{p_r}\right)^{-\kappa\,\delta\,q_t} \times \left(\frac{r_r}{r_v}\right)^{\gamma\,q_t}\frac{(1+\eta\,r_v)^{\kappa(1+\delta\,q_t)}}{(1+\eta\,r_r)^{\kappa\,\delta\,q_t}}$$

$(\theta_s)_1$

Approximation

≈ 1

θ_s ***compliquée ?***

En fait "similaire" à HH87, M93 ou E94, excepté ...

Calculs de s → θ_s → $(\theta_s)_1$ (3/3)

Approximation :

$$(\theta_s)_1 = \boxed{\theta_l} \exp[\boxed{\Lambda}\boxed{q_t}]$$

Generalisation / mélange des 2 variables de Betts :

$$\theta_l = \theta \exp\left(- \frac{L_v\, q_l}{c_{pd}\, T} \right)$$

$$q_t = q_v + q_l$$

+ valeurs absolues des entropies partielles →

$$\Lambda = [\,(s_v)_r - (s_d)_r\,] / c_{pd} \approx 5.87$$

Impacts des échanges q_d ←→ q_t ?

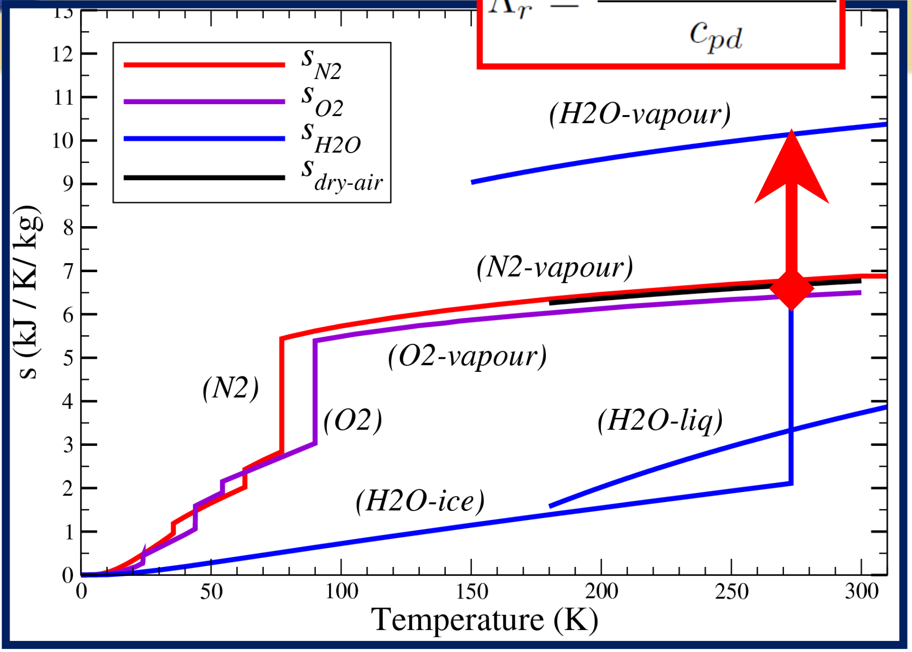
3ème Principe …

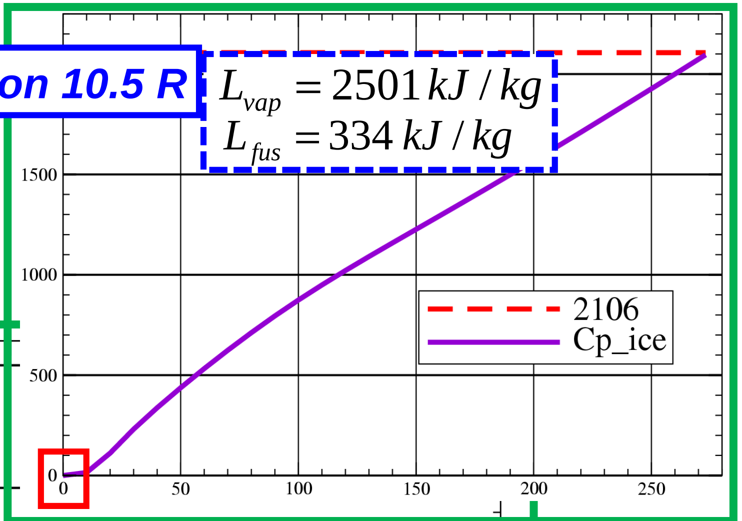
Mais on peut aussi garder l'expression complète pour θ_s !

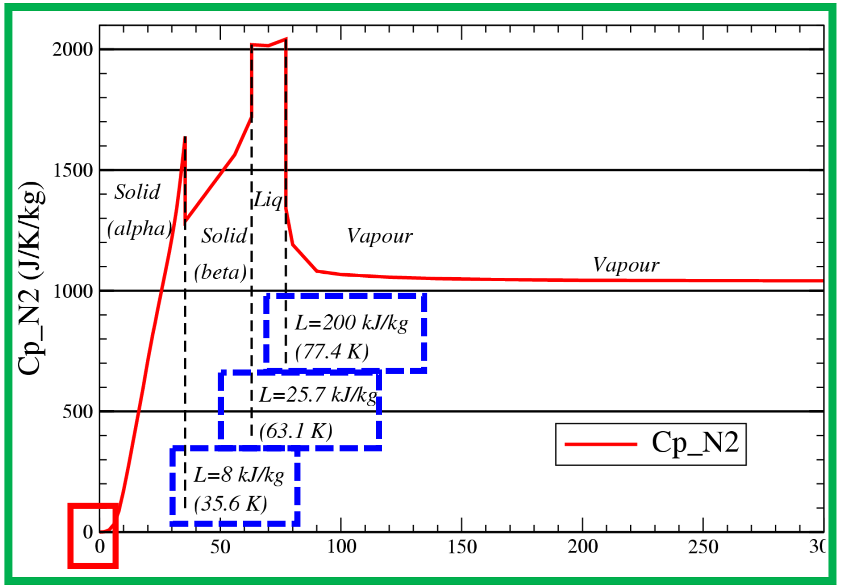
Valeurs de références ? Λ_r

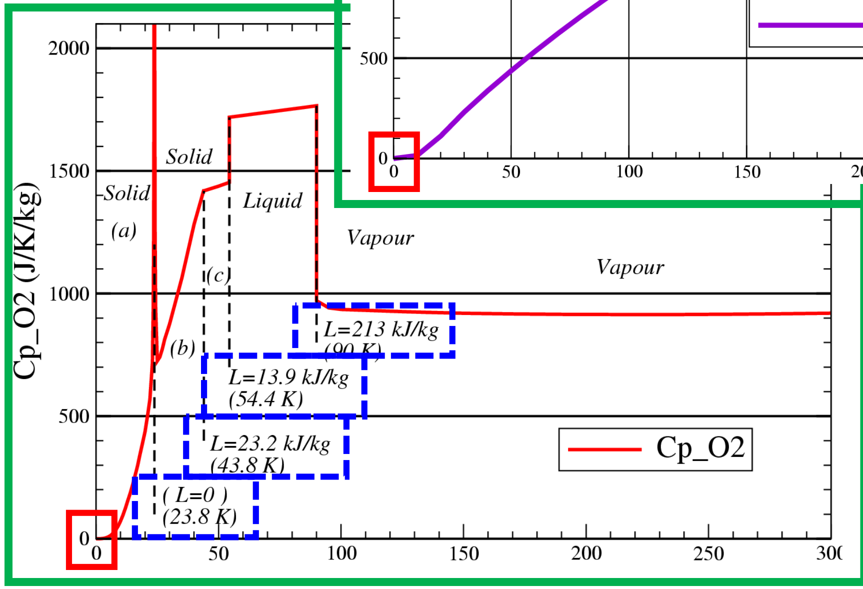
$$\Lambda_r = \frac{(s_v)_r - (s_d)_r}{c_{pd}}$$

$$s(T_0, p_0) = s(T=0) + \int_0^{T_0} \frac{c_p(T)}{T}\, dT + \sum_k \frac{L_k}{T_k} + \Delta s[\, p_{sat}(T_0) \to p_0 \,]$$









Plan de l'exposé

1) ***Motivations*** *: pourquoi s'intéresser à l'entropie ? (humide)*

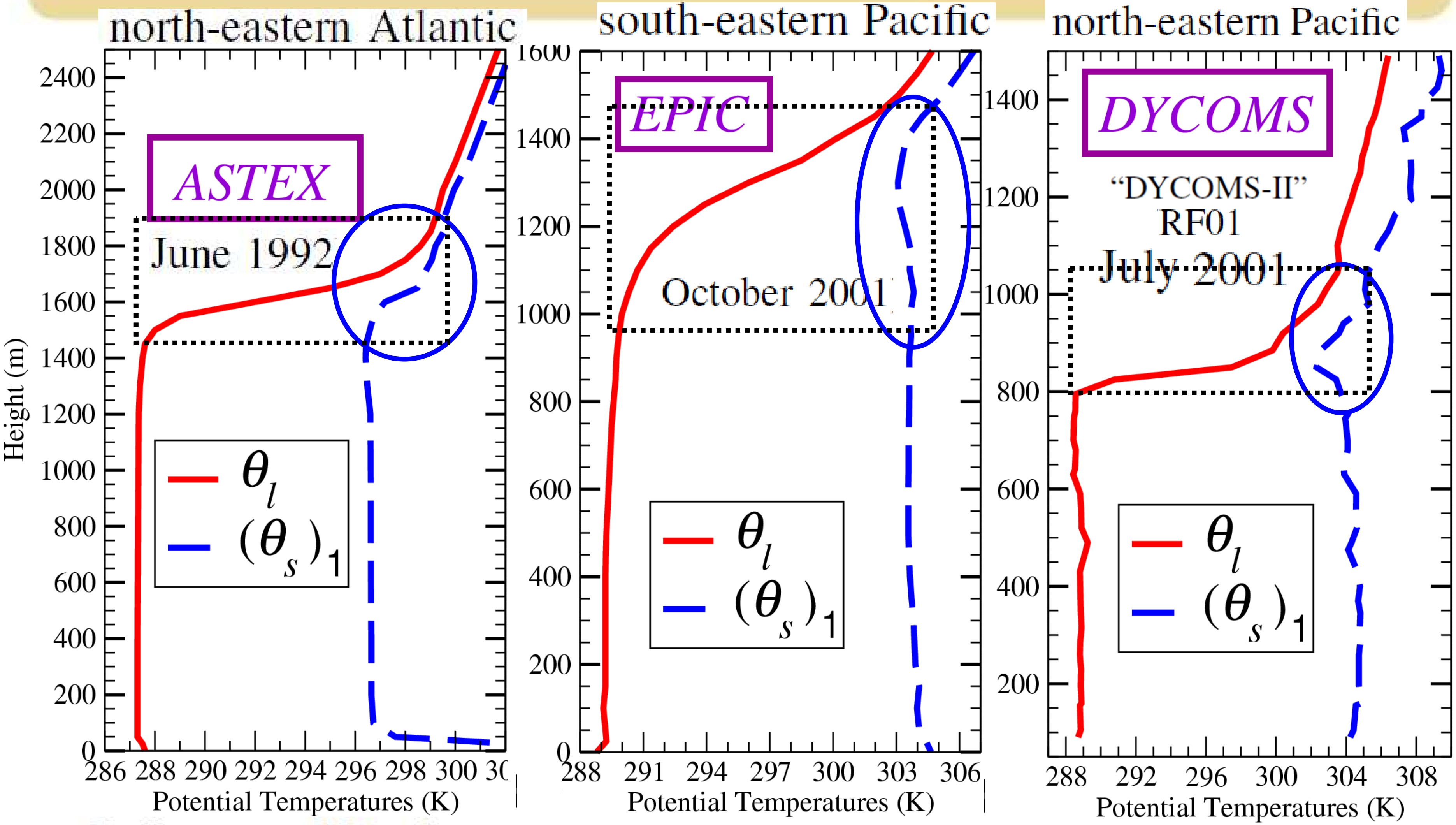
2) ***Comment calculer*** *l'entropie (humide) ?* $s = Cste + c_{pd} \ln(\theta_S)$

3) ***Applications*** **:** ***Strato-cumulus …*** → ***Turbulence ?***

4) ***Turbulence*** *: variables conservatives* (θ_S, q_t) *et* $\boxed{N^2}$ *?*

5) ***Conclusions – Perspectives*** → ***exposé de J-F. Geleyn …***

FIRE-I RF03B → 02B-04B-08B : OK ! … et :



Cuijpers and Bechtold (1995)

Bretherton et al. (2004)

Zhu et al. (2005)

METEO FRANCE

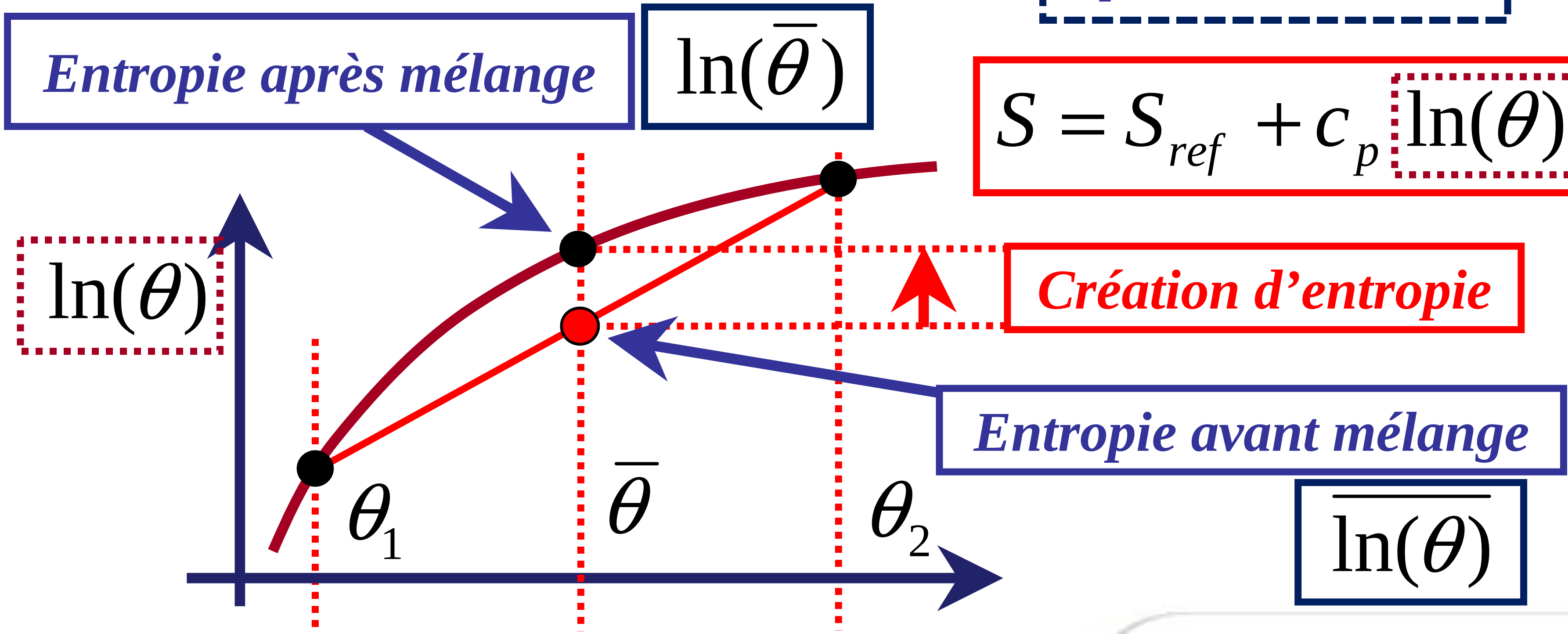
L'entropie « s » en turbulence ?

***Turbulence* : relier $\langle w's' \rangle$ avec $\langle w'\,\theta_l' \rangle$ et $\langle w'\,q_t' \rangle$?**

… Création d'entropie si homogénéisation (par ex. par la turbulence …) ??

$c_p(T)$ constant :

$$S = S_{ref} + c_p \ln(\theta)$$



Plan de l'exposé

1) *Motivations : pourquoi s'intéresser à l'entropie ? (humide)*

2) *Comment calculer l'entropie (humide) ?* $\boxed{s = Cste + c_{pd} \ln(\theta_s)}$

3) *Applications : Strato-cumulus … → Turbulence ?*

4) ***Turbulence : variables conservatives*** (θ_s, q_t) ***et*** $\boxed{N^2}$ ***?***

5) *Conclusions – Perspectives → exposé de J-F. Geleyn …*

Fréquence de Brunt-Väisälä N^2 / Marquet-Geleyn QJRMS (review)

Traditionnelement :

$$N_m^2 = \left(\frac{g}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)_{par.} - \left(\frac{g}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)_{env.}$$

→ variables conservatives :

$$N_m^2 = \frac{g}{\rho}\left.\frac{\partial \rho}{\partial z}\right|_{s,q_t} - \frac{g}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}$$

Variables conservatives :

$$\rho(s, q_t, p)$$

→ développement du gradient :

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} = \left.\frac{\partial \rho}{\partial s}\right|_{p,q_t}\frac{\partial s}{\partial z} + \left.\frac{\partial \rho}{\partial q_t}\right|_{p,s}\frac{\partial q_t}{\partial z} + \left.\frac{\partial \rho}{\partial p}\right|_{s,q_t}\frac{\partial p}{\partial z}$$

Hydrostatique :

$$dp = -\rho\, g\, dz$$

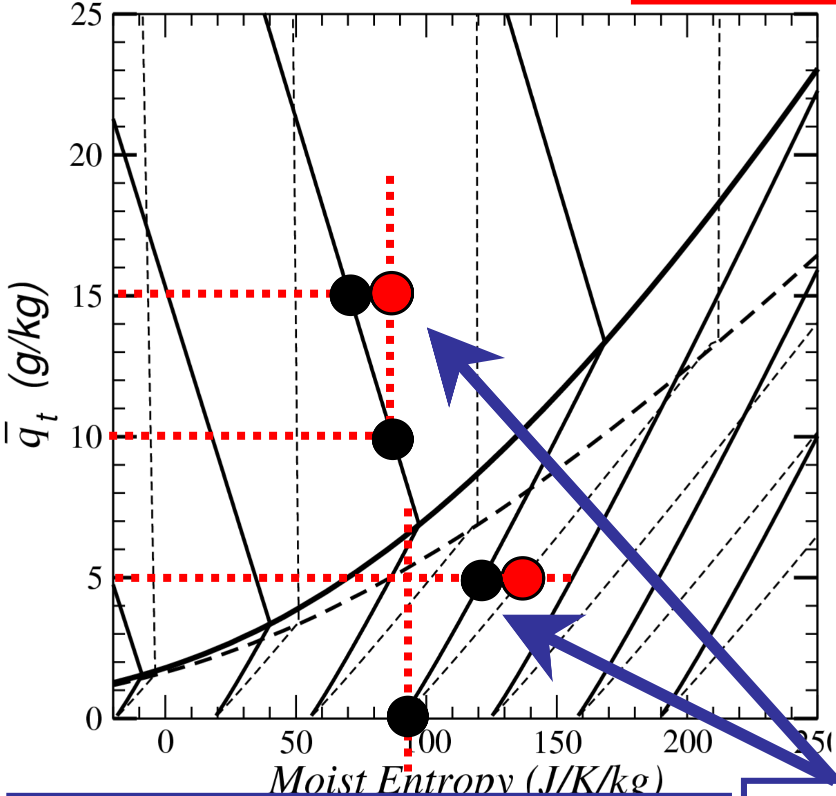
$$\left.\frac{\partial \rho}{\partial z}\right|_{s,q_t} = \frac{\partial \rho}{\partial z} - \left.\frac{\partial \rho}{\partial s}\right|_{p,q_t}\frac{\partial s}{\partial z} - \left.\frac{\partial \rho}{\partial q_t}\right|_{p,s}\frac{\partial q_t}{\partial z}$$

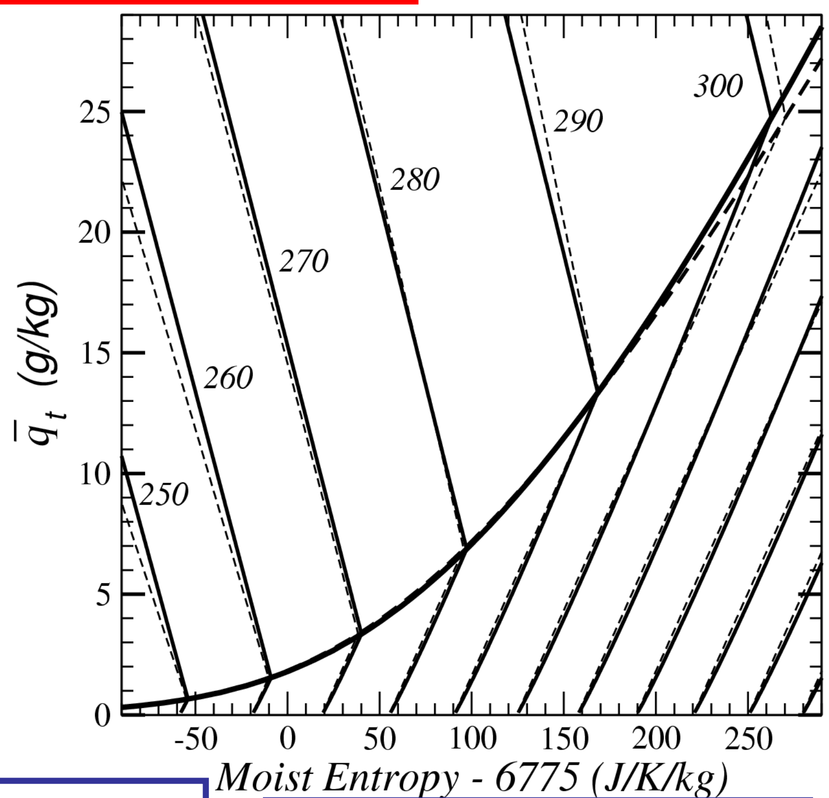
En variables conservatives :

$$N_m^2 = -\frac{g}{\rho}\left(\left.\frac{\partial \rho}{\partial s}\right|_{p,q_t}\boxed{\frac{\partial s}{\partial z}} + \left.\frac{\partial \rho}{\partial q_t}\right|_{p,s}\boxed{\frac{\partial q_t}{\partial z}}\right)$$

Comparaisons θ_S et $(\theta_S)_1$ ←→ Emanuel (1994) Pauluis (2010) ?

$$T = T\left(s, q_t, \, p = 900\,hPa\right)$$





Traits pleins : $s\,(\theta_S)$
Pointillés : Pauluis-Emanuel

Réponses en « s » différentes pour un même $\Delta\, q_t$!
→ vraie / fausse ?

Traits pleins : $s\,(\theta_S)$
Pointillés : $s_1\,[(\theta_S)_1]$

METEO FRANCE

Fréquence de Brunt-Väisälä N^2 / Marquet-Geleyn QJRMS (review)

$$N^2_{ns} = \Gamma_{ns}\,\frac{\partial s}{\partial z} + g\,\frac{\partial \ln(q_d)}{\partial z} + \Gamma_{ns}\left[(1+r_v)\,\frac{c_p\,R_v}{R} - c_{pd}\,(\Lambda_r + \Lambda_v)\right]\frac{\partial q_v}{\partial z}$$

$$N^2_{sw} = \Gamma_{sw}\,\frac{\partial s}{\partial z} + g\,\frac{\partial \ln(q_d)}{\partial z} + \Gamma_{sw}\left[(1+r_{sw})\,\frac{L_{vap}}{T} - c_{pd}\,(\Lambda_r + \Lambda_{sw})\right]\frac{\partial q_t}{\partial z}$$

$$N^2_{EM} = \frac{\Gamma_{EM}}{1+r_t}\,\frac{\partial s^*}{\partial z} + g\,\frac{\partial \ln(q_d)}{\partial z} - \frac{\Gamma_{EM}}{1+r_t}\,[\,c_l\,\ln(T)\,]\,\frac{\partial r_t}{\partial z},$$

$$N^2_{DK} = \frac{\Gamma_{DK}}{1+r_t}\,c_{pd}\,\frac{\partial \ln(\theta_q)}{\partial z} + g\,\frac{\partial \ln(q_d)}{\partial z}$$

$$\Lambda_r = \frac{(s_v)_r - (s_d)_r}{c_{pd}} \approx 5.87$$

$$\Lambda_v = \lambda\,\ln\left(\frac{T}{T_r}\right) - \kappa\,\delta\,\ln\left(\frac{p}{p_r}\right) - \gamma\,\ln\left(\frac{r_v}{r_r}\right) + \kappa\,\delta\,\ln\left(\frac{1+\eta\,r_v}{1+\eta\,r_r}\right)$$

$$\Lambda_{sw} = \lambda\,\ln\left(\frac{T}{T_r}\right) - \kappa\,\delta\,\ln\left(\frac{p}{p_r}\right) - \gamma\,\ln\left(\frac{r_{sw}}{r_r}\right) + \kappa\,\delta\,\ln\left(\frac{1+\eta\,r_{sw}}{1+\eta\,r_r}\right)$$

$$\left[\frac{R_v}{R} \approx 1.6\right] < [\,\Lambda_r \approx 5.9\,] < \left[\frac{L_{vap}}{c_{pd}\,T} \approx 8.5\right]$$

Changement de signe pour la seconde ligne → J.F.Geleyn …

METEO FRANCE

Fréquence de Brunt-Väisälä N^2 / Marquet-Geleyn QJRMS (review)

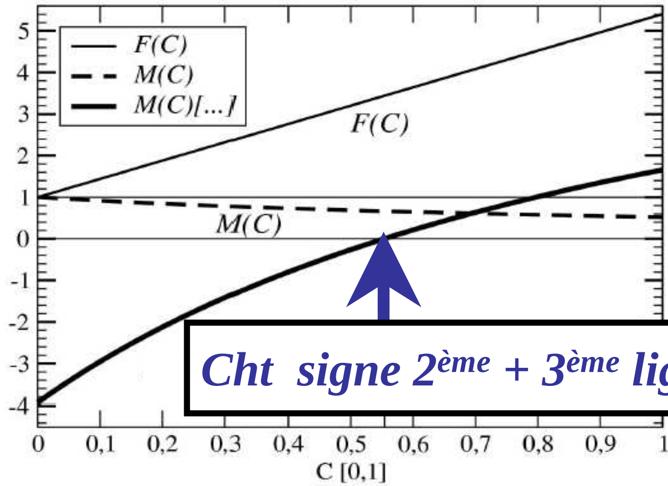
$$N^2(C) = g\,\boxed{M(C)}\left(\frac{\partial \ln(\theta_s)}{\partial z}\right)_E + g\left(\frac{\partial \ln(q_d)}{\partial z}\right)_E$$
$$+\; g\,\boxed{M(C)}\,\boxed{F(C)}\left[(1+r_v)\,\frac{R_v}{R}\right]_E\left(\frac{\partial q_t}{\partial z}\right)_E$$
$$-\; g\,\boxed{M(C)}\,[\,\Lambda_r + \Lambda_v\,]_E\left(\frac{\partial q_t}{\partial z}\right)_E$$

Formulation unifiée de N^2
C : non-sat. ←→ sat.

$$\boxed{F(C) = 1 + C\left[\frac{L_{vap}}{c_p\,T}\,\frac{R}{R_v} - 1\right]_E}$$

$$D_C = (1+\eta\,r_v)_E\left(\frac{L_{vap}\,q_v}{R_d\,T_v}\right)_E$$

$$\boxed{M(C) = \frac{1+D_C}{1+D_C\,F(C)}}$$



Cht signe 2ème + 3ème lignes …

	$C=0$	$C=1$
$F(C)$	1	$(L_{vap}\,R)/(c_p\,R_v\,T)$
$M(C)$	1	D_{1w}/D_{2w}

Plan de l'exposé

1) *Motivations : pourquoi s'intéresser à l'entropie ? (humide)*

2) *Comment calculer l'entropie (humide) ?* $s = Cste + c_{pd} \ln(\theta_s)$

3) *Applications : Strato-cumulus … → Turbulence ?*

4) *Turbulence : variables conservatives* (θ_s , q_t) *et* $\boxed{N^2}$ *?*

5) ***Conclusions – Perspectives***

METEO FRANCE

Conclusions - Perspectives

a) On peut calculer une entropie (humide) : $s = Cste + c_{pd} \ln(\theta_s)$

b) Applications : Strato-cumulus … Turbulence humide …
variables conservatives : (θ_s , q_t) *… en particulier* N^2

c) → exposé de J-F. Geleyn …

d) Applications : autres prospectives : … Enthalpie et PV humides (→ Dprévi/LABO) … en 2013 ?

Merci ! Questions ?

METEO FRANCE