

Quelques aspects de l'énergétique de l'air humide pour le cyclone "Dumilé" et pour "Hector the Convective".

par Pascal Marquet (CNRM/GMAP/Proc)
et Thibaut Dauhut (OMP / Laboratoire d'Aérodynamique)

AMA-2018 (Toulouse, 12 février 2018)



Motivations : 2 articles récents (JAS oct. 2017)

Th. Dauhut, J.-P Chaboureau, P. Mascart, O. Pauluis :

“The Atmospheric Overturning Induced by Hector the Convecteur”

- Meso-NH/LES (200 m) ; analyses isentropiques avec entropie $\approx s(\theta_e)$; θ_e const. si adiab. (ferm e) ou pseudo-adiab ; Fonction de courant $\Psi(\theta_e)$
- Tendances diabatiques  valu es avec :

$$MSE_I = c_{pd} T + L_s r_v + L_f (r_c + r_r) + \phi$$

P. Marquet : *“A Third-Law Isentropic Analysis of a Simulated Hurricane”* (Dumilé ; 3/1/2013)

- ALADIN-Réunion (10 km) ; analyses isentropiques avec entropie $= s(\theta_s)$; 3 me principe ($q_t \neq Cste$) ; Fonction de courant $\Psi(\theta_s)$
-  nergie totale  valu e avec :

$$h + \phi = c_{pd} T - L_v q_l - L_s q_i + L_h q_t + \phi$$

Travaux en commun grâce à DEPHY2 (2015...2017)

But de cette étude préliminaire :

- (1) refaire les analyses isentropiques pour Hector et avec l'entropie définie par $s(\theta_s)$ (3 me principe) et la fonction de courant associ e $\Psi(\theta_s)$, où $\theta_s \approx \theta_{il} (1 + 6 q_t)$
→ **liens avec $s(\theta_e)$ et $\Psi(\theta_e)$** , où $\theta_e \approx \theta_l (1 + 9 q_t)$?

Travaux en commun grâce à DEPHY2 (2015...2017)

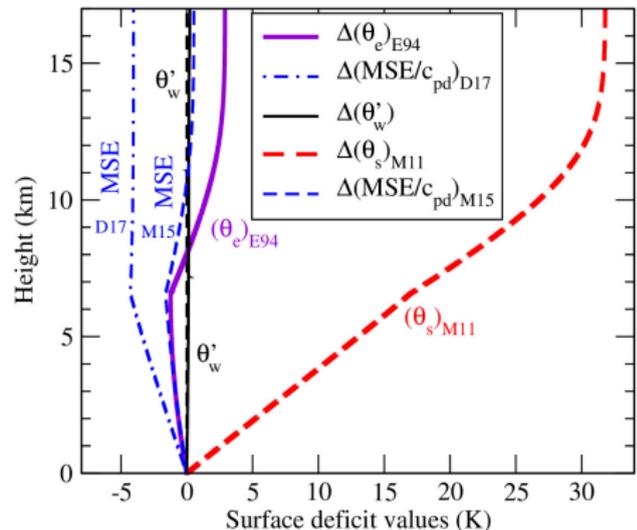
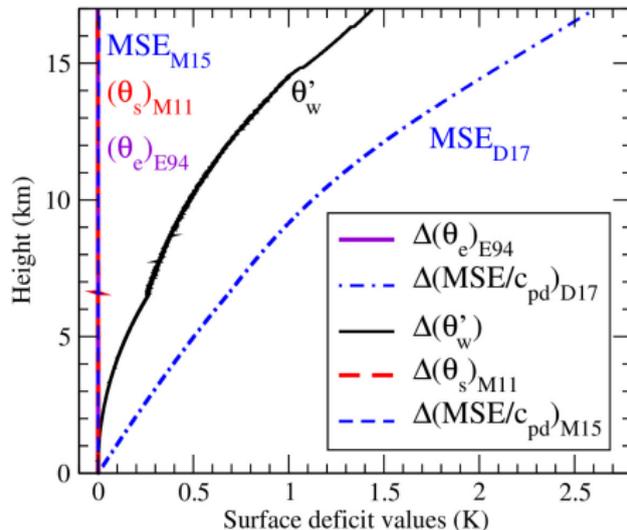
Quelles lois de "conservation" ? / Quantités "conservatives" ?

- (1) **quid** $\theta_e \approx \theta_l (1 + 9 q_t) \leftrightarrow \theta_s \approx \theta_{il} (1 + 6 q_t)$?

$$\theta_e \approx \underbrace{\left[T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R_d/c_{pd}} \right]}_{\theta : \text{temp.} - \text{press.}} \exp \left(- \frac{L_v q_l}{C_{pd} T} \right) \underbrace{\exp \left(\frac{L_v}{C_{pd} T} q_t \right)}_{\approx (9 q_t)} \quad dq_t \neq 0 ; q_v \leftrightarrow q_d$$

$$\theta_s \approx \underbrace{\left[T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R_d/c_{pd}} \right]}_{\theta : \text{temp.} - \text{press.}} \exp \left(- \frac{L_v q_l + L_s q_i}{C_{pd} T} \right) \underbrace{\exp \left(\Lambda q_t \right)}_{\approx (6 q_t)} \quad dq_t \neq 0 ; q_v \leftrightarrow q_d$$

ADIABATIQUES versus PSEUDO-ADIABATIQUES



- **Adiabatique** : θ_e , θ_s , $h + \phi$ conservées sauf $\theta'_w \nearrow$ logiquement, et $\text{MSE}_{D17} \nearrow$ aussi car " $L_h(T) q_t$ " dépend de T , même si q_t constant
- **Pseudo-adiabatique** : $\theta_s \nearrow$ logiquement (irr.) ; MSE_{D17} conservée pour $q_i + q_s + q_g$; mais pas θ_e ni $h + \phi$... (même si pas autant que $\theta_s =$ entropie : un facteur 10)

Travaux en commun grâce à DEPHY2 (2015...2017)

Autre but de cette étude préliminaire :

- (2) recalculer les tendances diabatiques déjà évaluées pour Hector avec :

$$MSE_I = c_{pd} T + L_s r_v + L_f (r_c + r_r) + \phi$$

avec celles évaluées avec :

$$h + \phi = c_{pd} T - L_v q_l - L_s q_i + L_h q_t + \phi$$

→ **comparaisons entre MSE_I et $h + \phi$?**

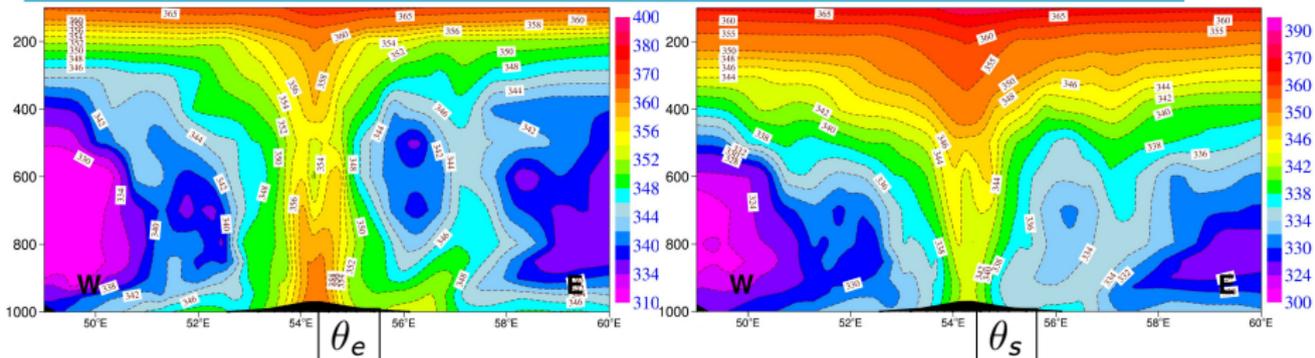
Plan de l'exposé :

Plan de l'exposé :

- 1) **Cyclone Dumilé (ALADIN-Réunion ; 3/1/2013)**
- 2) Entropie : “Hector the Convecteur” (Meso-NH)
- 3) Énergie-Enthalpie-MSE : “Hector the Convecteur”
- 4) Conclusions - Perspectives



Entropie et cyclone ? (M2-2013 ... JAS-2017)



- **Cyclone Dumilé / ALADIN-Réunion (03/01/2013 p12h)**
- θ_e : un “pied chaud” au centre ; extension jusqu’à 300-200 hPa
- θ_s : “mini relatif” au centre ; \approx const dans la CLP (turb.) ; \rightarrow 500-300 hPa
- une seule définition des isentropes **car entropie = fonction d’état** \Rightarrow **usage de θ_s si q_t varie pour définir les isentropes** (alors que $\theta_e \leftrightarrow$ pseudo-adiab)
- θ_s : une “**aspiration des isentropes humides**” dans la troposphère (idem aspiration des iso- θ sèche à la tropopause...)
- \rightarrow travail d’interprétation de θ_e et de θ_s : à poursuivre...

$$ds/dt = (c_{pd}/\theta_s) d\theta_s/dt = \dot{Q}/T + \dots$$
 (cf bilans Arpege 1989 ?)

... différents calculs pour le cyclone Dumilé ...

Impact de la définition de l'entropie ? 2 premiers exemples :

- Travail mécanique par unité d'air humide/sec : **±50 %**

$$w = - \int \frac{dp}{\rho} = \int T ds + \int (\mu_v - \mu_d) dq_t$$

- $\int T ds$: **facteur 5 à 10** fonction des définitions pour "s"
- Rendements (vison en "machine de Carnot") : **±50 %**

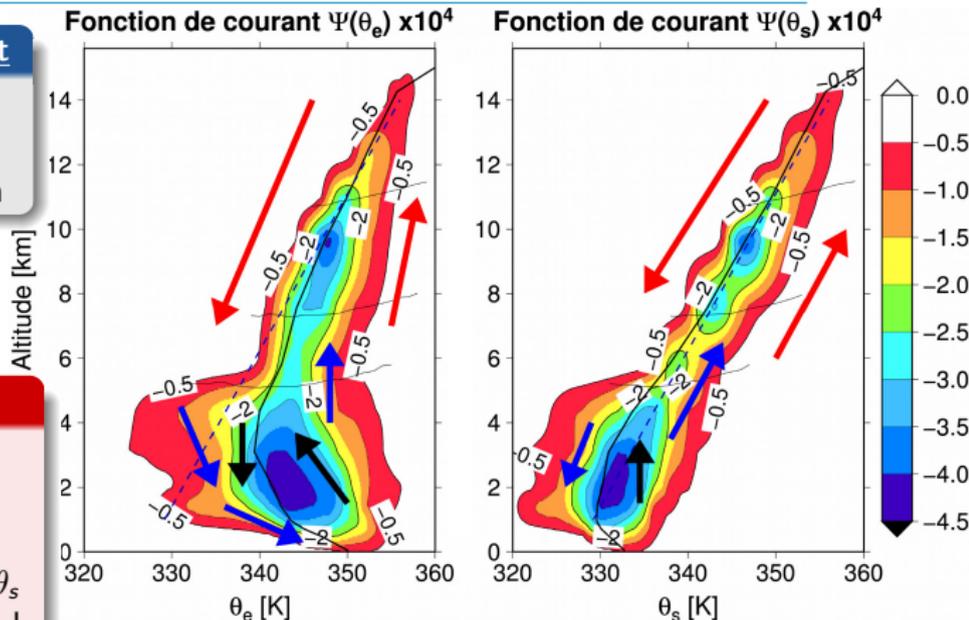
Entropie et “Dumilé” ? (Marquet JAS-2017)

Fonction de courant

- $\Psi(\theta_e)$ et $\Psi(\theta_s)$
- Cyclone Dumilé
- ALADIN - Réunion

Des différences :

- \neq Pauluis (2016) !
- impact de q_t qui varie spatialement
- variations de θ_e et θ_s
0 \leftrightarrow 4 km : \searrow et \nearrow !
- entropie = $s(\theta_s)$
- mais que mesure θ_e ?

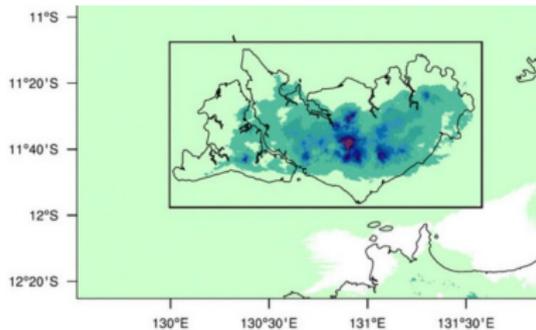


$$\Psi(\theta_{e/s}, z) = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{e/s}} \int_{r=0}^{\infty} \langle \rho w \rangle (r, \theta, z) dr d\theta$$

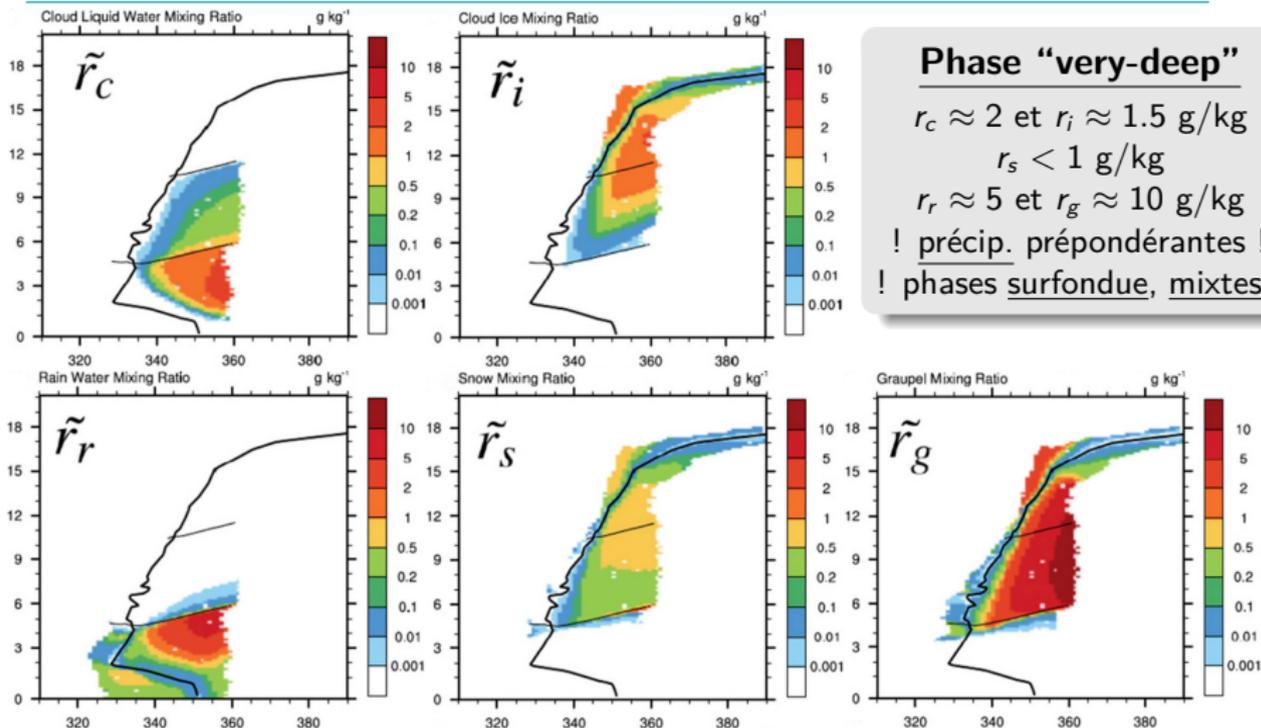
Plan de l'exposé :

Plan de l'exposé :

- 1) Cyclone Dumilé (ALADIN-Réunion ; 3/1/2013)
- **2) Entropie : "Hector the Convector" (Meso-NH)**
- 3) Énergie-Enthalpie-MSE : "Hector the Convector"
- 4) Conclusions - Perspectives



Eaux (vap/con/prec) dans "Hector" ? Dauhut JAS-2017



Phase "very-deep"

$$r_c \approx 2 \text{ et } r_i \approx 1.5 \text{ g/kg}$$

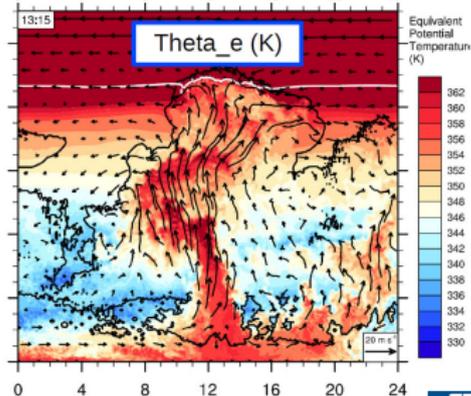
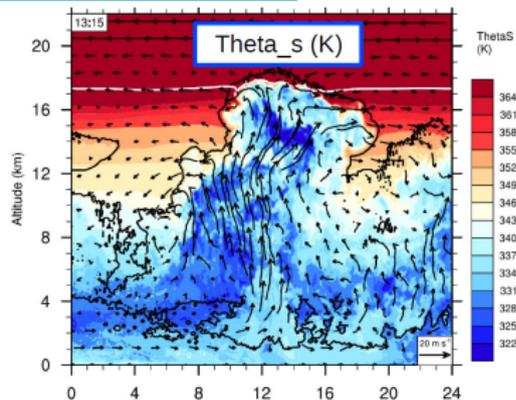
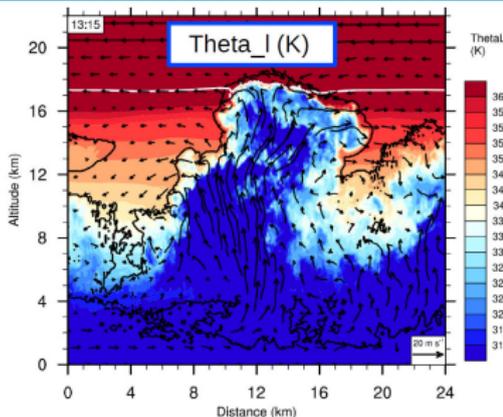
$$r_s < 1 \text{ g/kg}$$

$$r_r \approx 5 \text{ et } r_g \approx 10 \text{ g/kg}$$

! pr ecip. pr epond erantes !

! phases surfondue, mixtes !

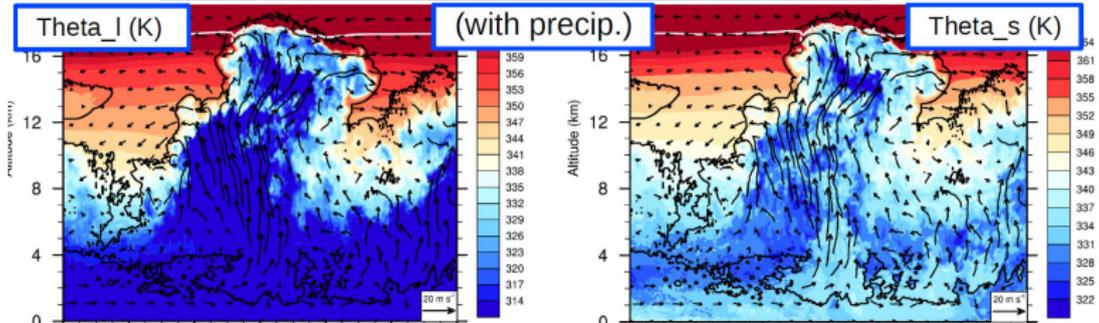
L'entropie dans "Hector" (θ_l , θ_s , θ_e) ?



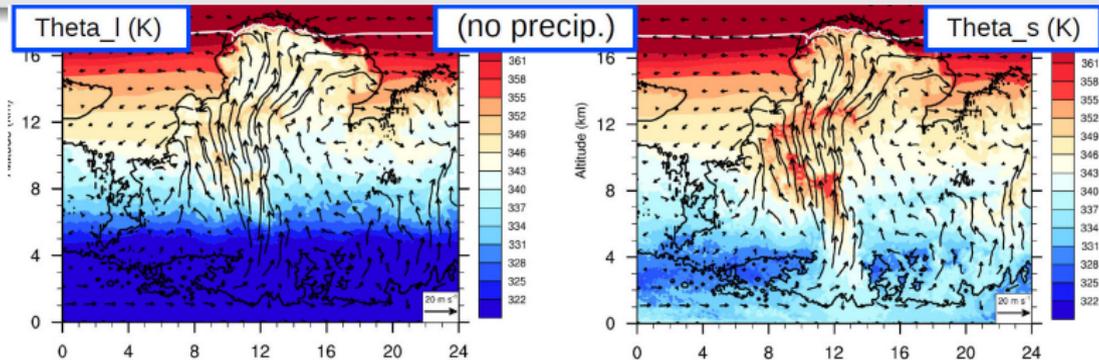
Hector: « very deep »
convective phase (13:31 / 13:45)

- θ_s en position $6/9=2/3$ entre θ_l (froid) et θ_e (chaud) dans le nuage ;
- updraft et CLP très chauds en θ_e ?
- sommet nuage \approx aussi chaud en θ_e que dans l'environnement ?

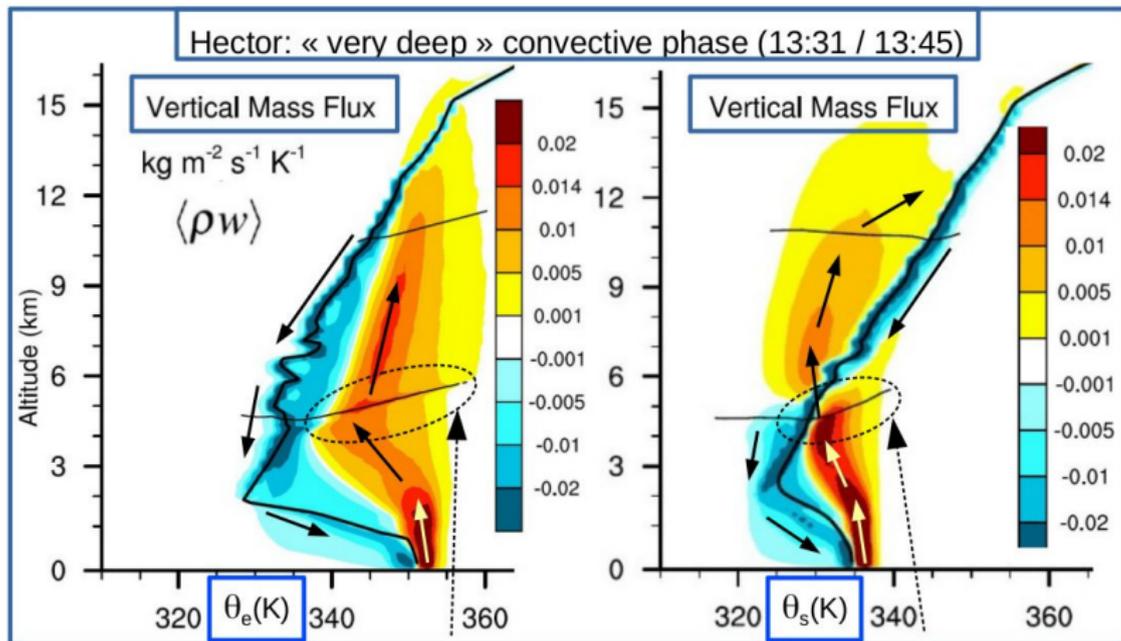
L'entropie dans "Hector" : precip & (θ_l, θ_s) ?



- Un impact majeur des précipitations sur θ_l et θ_s ! • (r_r, r_s, r_g) inclus dans ces diag Meso-NH de θ_l et θ_s • alors que (q_r, q_s) pas inclus dans ARP & IFS & LMD

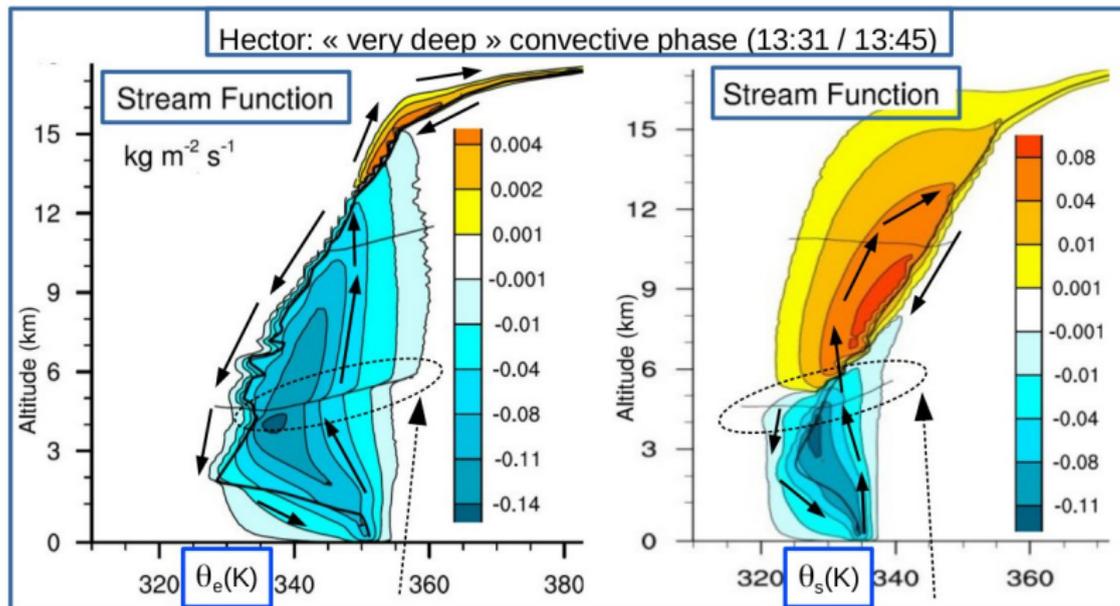


L'entropie dans "Hector" : flux de masse ?



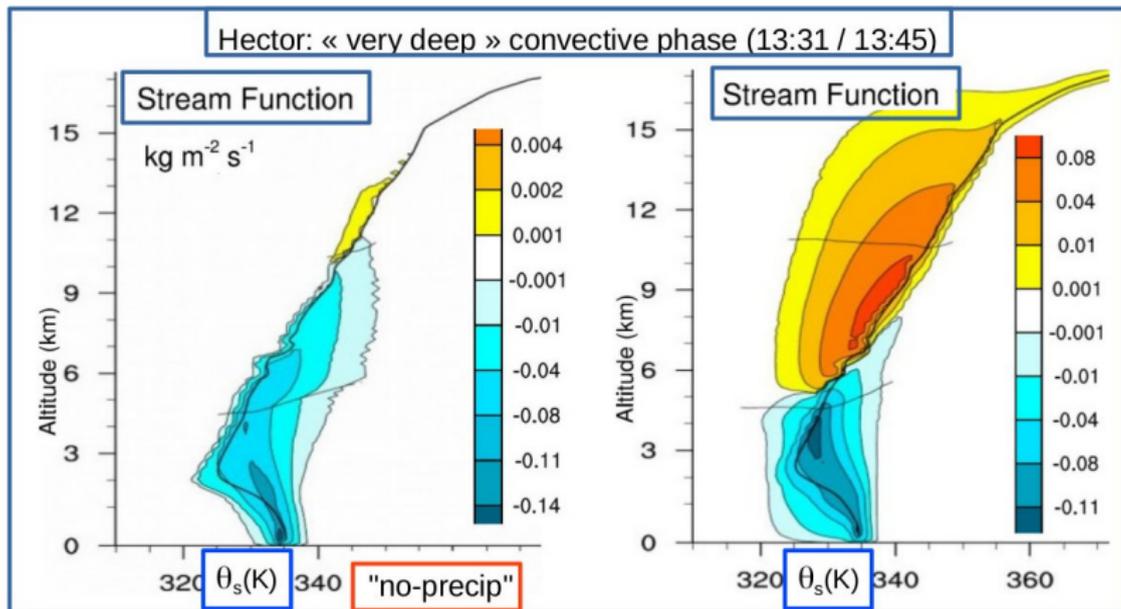
- θ_s plus pertinent ? gradients (micro-phys) continus à 0°C, discontinus pour θ_e
- Question : pourquoi cette structure "en 8" avec θ_s ? (déjà présente avec θ_e ...)

L'entropie dans "Hector" : fonction de courant ?



- θ_s plus pertinent car gradients continus à 0°C ? $\theta_e \neq$ entropie si q_t variable...
- Cette structure "en 8" pour θ_s : impact des précipitations ? preuve avec/sans ?

L'entropie dans "Hector" : fonction de courant & precip ?

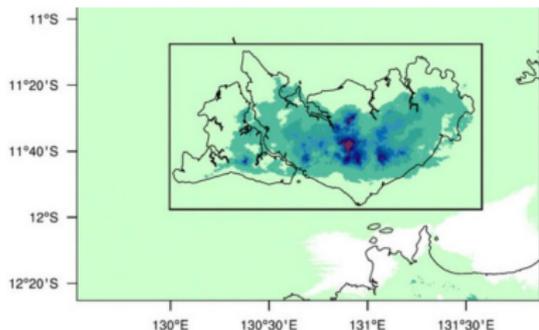


- $\theta_s \approx \theta (1 - 9 q_l - 10 q_i) [1 + 6 (q_v + q_l + q_i)]$ avec les précipitations à droite, sans les précipitations (q_r, q_s, q_g) à gauche ...
⇒ Oui : la structure "en 8" pour θ_s est due aux précipitations !
- Mais pas de sensibilité aux précipitations pour $\theta_e \approx \theta (1 + 9 q_v)$

Plan de l'exposé :

Plan de l'exposé :

- 1) Cyclone Dumilé (ALADIN-Réunion ; 3/1/2013)
- 2) Entropie : "Hector the Convector" (Meso-NH)
- **3) Énergie-Enthalpie-MSE : "Hector the Convector"**
- 4) Conclusions - Perspectives



Bilan de l'énergie / enthalpie ?

“ nergie totale” : $e_{tot} = e_{cin} + e_{pot} + e_{int}$

$$e_{cin} \approx v^2/2 ; \quad e_{pot} \approx g z ; \quad e_{int} = h - p/\rho \approx c_v T + f(q_v, q_l, q_i)$$

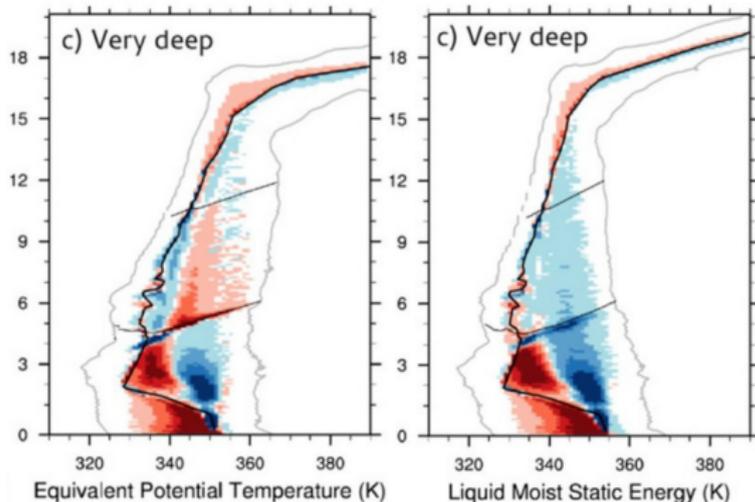
Richardson (1922) / Montgomery (1948) / Businger (1982) :

- Que se passe-t-il quand de l'eau est en(d )traîné dans l'air humide ?
⇒ connaître les valeurs **de référence** pour l'entropie et l'énergie ...
⇒ et en particulier $\bar{\rho} \overline{w'h'} \approx SH + LH^* =$ flux de l'enthalpie ...

Conséquences :

devoir définir $h = e_{int} + p/\rho$ avec $h + phi =$ “MSE” ?

Tendances diabatiques dans Hector ? / Dauhut JAS-2017



“diabatic sources” ?

$$\langle \rho \dot{\theta}_e \rangle \approx -\partial \Psi_e / \partial z + \dots$$

$$\langle \rho \text{MSE}_I \rangle \approx -\partial \Psi_I / \partial z + \dots$$

“liquid” version “MSE_I” :

$$c_{pd} T + L_{sub} r_v + L_{fus} (r_c + r_r) + \phi$$

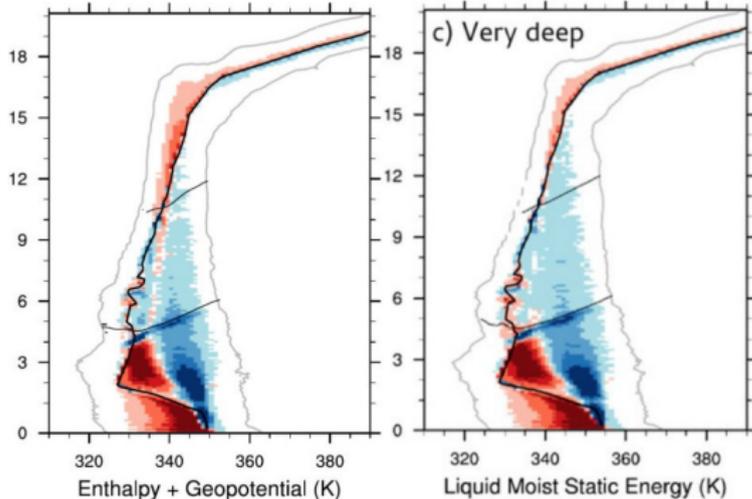
Résultats :

- un “choc” à 0  C pour θ_e + chgt signe ...
- moins de choc pour MSE_I et < 0 à 0  C ...
- pourquoi MSE_I est-elle “plus pertinente” ?

Une explication possible :

MSE_I correspondrait-elle à $h + \phi$, qui est définie en thermodynamique ?

Tendances diabatiques dans Hector ?



“liquid” version “MSE_l” :

$$C_{pd} T + L_{sub} r_v + L_{fus}(r_c + r_r) + \phi$$

Explication, en effet :

$h + \phi$ est proche de MSE_l
avec l'enthalpie h donn e par :

Marquet (2015 a,b,c) :

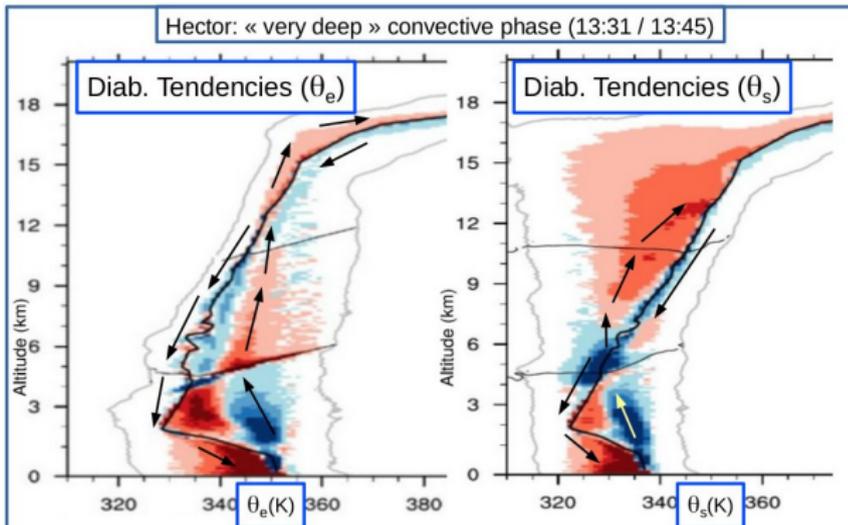
$$h = c_{pd} T - L_{vap} q_l - L_{sub} q_i + L_h q_t \quad (\text{avec } L_h = h_v - h_d)$$

$$h = c_{pd} T + L_{sub} q_v + L_{fus} q_l + (L_h - L_{sub}) q_t$$

$$L_h \approx 2600 \text{ kJ/kg} \text{ et } L_{sub} \approx 2850 \text{ kJ/kg} \Rightarrow (L_h - L_{sub}) \approx -250 \text{ kJ/kg}$$

petit par rapport à “ $L_{sub} q_v$ ” & \approx *constant* si q_t constant ...

Tendances diabatiques dans Hector : $\theta_e \leftrightarrow \theta_s$?



Comparaisons des “tendances diabatiques” pour $\theta_e \leftrightarrow \theta_s$?

- Peut-être une plus grande coh ence avec θ_s : “impact de la convection” = refroidissement à la mont e \rightarrow 7 km, versus réchauffement au dessus ?
- zone > 0 juste sous l’iso-zéro : micro-phys $r_s + r_g$ irrev.   $T > 0^\circ \text{C}$?
- une structure plus complexe lié à l’iso-zéro avec θ_e ?

Plan de l'exposé :

Plan de l'exposé :

- 1) Cyclone Dumilé (ALADIN-Réunion ; 3/1/2013)
- 2) Entropie : "Hector the Convecteur" (Meso-NH)
- 3) Énergie-Enthalpie-MSE : "Hector the Convecteur"
- **4) Conclusions - Perspectives**

Conclusions - Perspectives

- L'**entropie** et les **isentropes** de l'air humide sont bien définies avec θ_s dans tous les cas ; Bilans possibles (Arpege...)
 - θ_l et/ou θ_e ont des intérêts, mais moins universels : adiab et $q_t = \text{Cste}$; ou pseudo-adiab via l'hypothèse $s_{d0} \equiv s_{l0}$ ($q_d \leftrightarrow q_r$)
 - L'**enthalpie** (thermique) de l'air humide peut remplacer certaines **MSE**, via l'expression $h + \phi \approx \text{MSE}_l$.
-
- Un **gros impact des humidités** : vapeur + condensats nuageux, voire **précipitations** ici pour Hector / Meso-NH ?
 - Des **résultats nouveaux et pertinents** : plus "doux" autour de l'iso-zéro pour Hector \Rightarrow calculs entraînements ?
 - Une vision différente de celles de Betts, Emanuel, Pauluis, car **impacts de $q_t \neq \text{Cste}$** pris en compte dans θ_s et h ...
 - Des résultats nouveaux, car **variables plus "conservées"** ? (comme pour θ_s dans la CLP des Sc marins)

Questions ?

Entropie dans ARPEGE : DDH ?

Diagnostics in Horizontal Domains (DDH)

Variables and budget equations, in horizontal mean

ARPEGE, ALADIN and AROME models

Guide for users and developers

January 9, 2018

- $s_a = c_{pa} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_a \ln\left(\frac{p_a}{p_0}\right) + s_a^0$.
- $s_v = c_{pv} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R_v \ln\left(\frac{p_v}{p_0}\right) + s_v^0$.
- $s_l = c_w \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + s_l^0$.
- $s_g = c_g \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + s_g^0$.
- $s_a^0 = 6775 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- $s_v^0 = 10320 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- $s_l^0 = 3517 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- $s_g^0 = 2296 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Exemples de bilans ?

- DDH-ARPEGE : à compléter ?
- Pascale *et al.* (GCM-UKMO)
- Marquet (annexe QJ-2011)

4.7 Entropy budget

Budget equation

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (r_\eta s) = & -\text{div}_\eta (r_\eta s \vec{v}) - \frac{\partial}{\partial \eta} (r_\eta s \dot{\eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[s_l (F_p^{\text{conv-l}} + F_p^{\text{stra-l}}) + s_g (F_p^{\text{conv-n}} + F_p^{\text{stra-n}}) \right] \\ & - \frac{1}{T} \vec{v} \cdot \frac{\partial}{\partial \eta} (\vec{F}_v^{\text{tur}} + \vec{F}_v^{\text{tur-conv}} + \vec{F}_v^{\text{rel}}) - (s_v - s_a + c_{pv} - c_{pa}) \frac{\partial}{\partial \eta} (F_q^{\text{tur}} + F_q^{\text{tur-conv}}) \\ & + \frac{1}{T} (F_h^{\text{sol}} + F_h^{\text{ther}} + F_h^{\text{tur}} + F_h^{\text{tur-conv}}) - (1 - \delta_m) \left[s_a \frac{\partial F_p}{\partial \eta} + \frac{1}{T} c_{pa} \frac{\partial T}{\partial \eta} F_p \right] + \delta_m \frac{1}{T} F_p \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \end{aligned}$$

- $r_\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial p}{\partial \eta}$.
- $s = s_a + (s_v - s_a) q_v$.

The horizontal divergence term is computed as

$$\text{div}_\eta (r_\eta s \vec{v}) = s \text{div}_\eta (r_\eta \vec{v}) + r_\eta \vec{v} \cdot \vec{\nabla} s$$

where

- $\vec{v} \cdot \vec{\nabla} s = (s_v - s_a) \vec{v} \cdot \vec{\nabla} q_v + \vec{v} \cdot [c_p \vec{\nabla} \ln T - R \vec{\nabla} \ln p]$.
- $\vec{v} \cdot \vec{\nabla} \ln p = RTGR \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \pi$.

Adiabatique ou Pseudo-Adiab. ?

Pauluis : Rossby (1937) ; Namias (1939) ... en fait Rossby (1932)...

- Une vision li e à l'émagramme : $\theta'_e \approx T (p_0/p_d)^{\kappa} \exp[(L_v r_v)/(c_{pd} T)]$
 tablie à partir de l'équation d'une pseudo-adiabatique (θ'_w)
- Avec pour l'entropie $s \approx c_{pd} \ln(\theta'_e)$

Emanuel (1994) & Pauluis (2010, ...) :

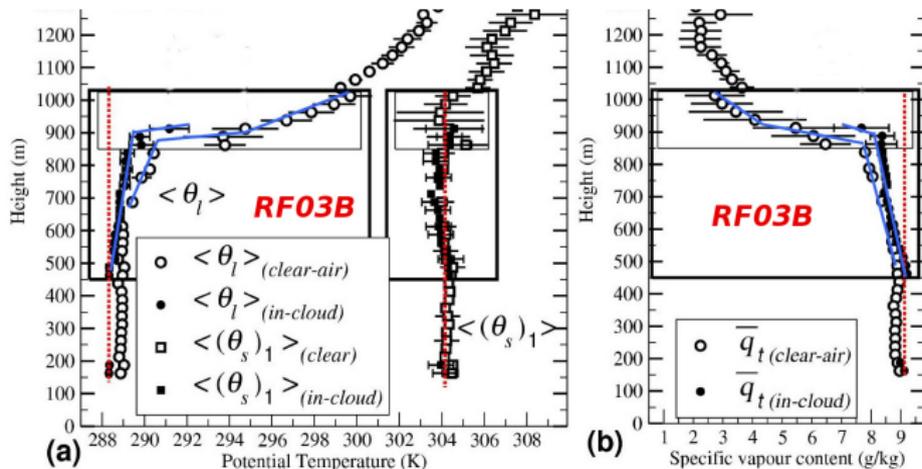
- Un "synonyme" de l'entropie : $s = c_m \ln(\theta_e/T_0) + s_m$
avec $c_m = c_{pd} + r_t c_l$ et $s_m = s_{d0} + r_t (s_{l0} - s_{d0})$ qui dépend de r_t
 $\Rightarrow \theta_e \approx T (p_0/p_d)^{R_d/c_m} \exp[(L_v r_v)/(c_m T)] (H)^{-r_v R_v/c_m} \approx \theta'_e$

Conséquences :

- 1) r_t constant $\Rightarrow \theta_e$ conserv e comme l'entropie si adiabatique réversible
- 2) pseudo-adiab. $\Rightarrow \theta_e$ presque conserv e (\neq l'entropie) si $s_m \equiv 0$ et

$$s_{l0} \equiv s_{d0} \Rightarrow \text{presque invariant si } dr_l \neq 0 \text{ et } q_l \leftrightarrow q_d \text{ (} c_m \neq c_{pd} \text{ et } H)$$

Entropy in marine Sc (Marquet QJRMS 2011)



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

$$\rightarrow \theta_l \approx \theta \exp(-9 q_l)$$

$$\theta_{s1} \approx \theta_l \exp(6 q_t)$$

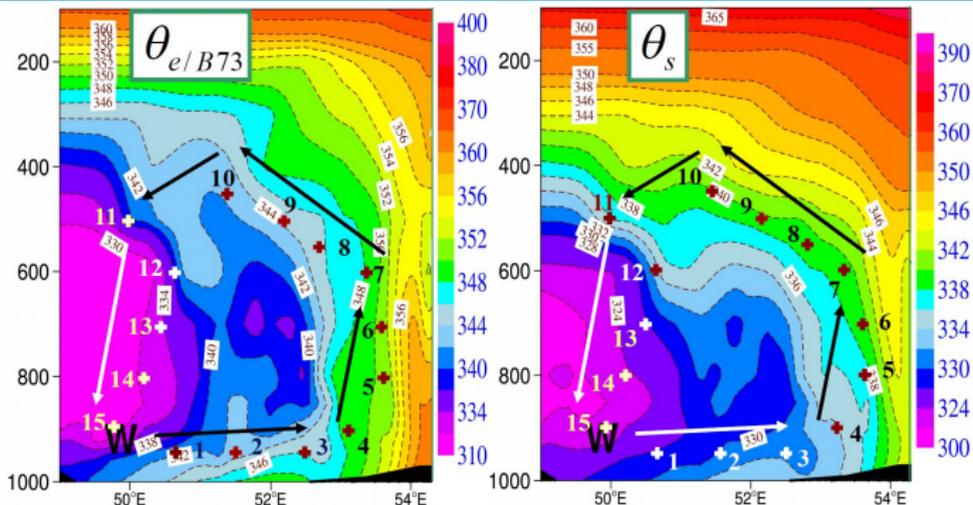
$$\rightarrow \theta_e \approx \theta_l \exp(9 q_t)$$

Observations FIRE-I

Radial-Flight RF03 (+02
+ 08 + 10) raw data

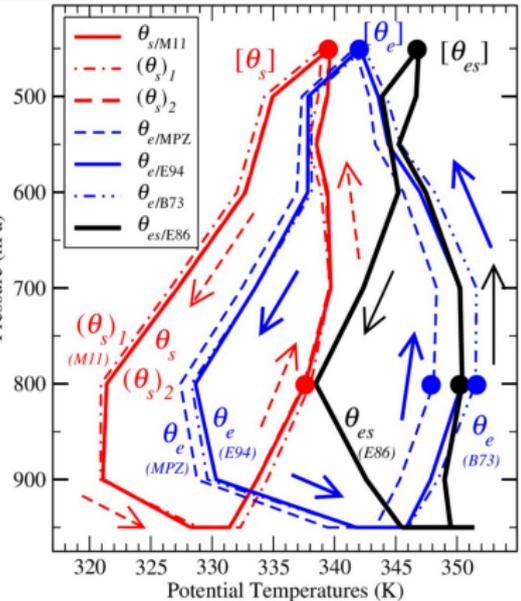
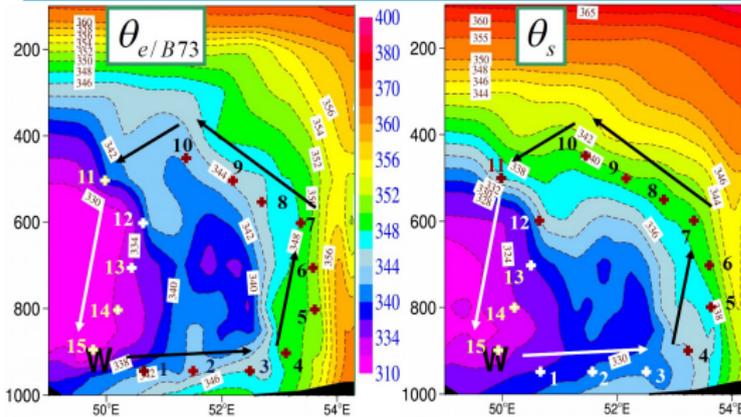
- The “conserved” Bett’s variables (1973) are “not-conserved”!
- θ_l and q_t vary with height, are different within ● and outside ○ clouds ;
- large top-PBL jumps at the inversion for $\Delta\theta_l \approx 10$ K and $\Delta q_t \approx 5.5$ g/kg
- ... whereas almost constant θ_s (entropy) along z (within error-bars)! and for both cloud ● and clear-air ○ values! and almost no top-PBL jumps!

Entropie et “Dumilé” ? (Marquet JAS-2017)



“Cycles de Carnot” ou “Steam cycles”
(cyclone Dumilé ; la Réunion ; 03/01/2013 p12h)

Entropie et “Dumilé” ? (Marquet JAS-2017)



Cycle de Carnot pour le cyclone Dumilé :
(la Réunion 03/01/2013 p12h)

- 3 familles θ_s , θ_e , θ_{es} (gauche à droite)
- valeurs $\theta_s \nearrow$ versus $\theta_e \searrow$ à la montée ?
- une seule entropie (fonction d'état) : θ_s

Entropie et “Dumilé” ? (Marquet JAS-2017)

Calcul du travail mécanique ? (pour ce cycle de Carnot + Dumilé)

$$W_H = \oint T ds \approx \oint \left(dh - \frac{dp}{\rho} \right) \approx - \oint \frac{dp}{\rho} ; \text{ car } \oint dh \equiv 0$$

Des résultats fort différents ! “+55” ↔ “+38” – “-23” %

“θ”	$\theta_{es}/E86$	$\theta_s/M11$	θ_e/MPZ	θ_s	$\theta_{es}/E86$	$\theta_e/E94$
“s”	s/q_d	s	s/q_d	s/q_d	s/q_d	s/q_d
“ c_p ”	c_{pd}	c_{pd}	c_{pl}^*	c_{pd}	c_{pl}^*	c_{pl}^*
Offset	-5650	-6850	+550	-6700	-5610	-2300
“ W_H ”	442	870	1158	1528	2758	3405
“V”	29.7	41.7	48.1	55.3	74.3	82.5

- Gros impact du choix de θ_s ou θ_e ou θ_{es} ! (442 ↔ 3405 : ×7.7)
- Gros impact sur la “vitesse” $W_H \approx V^2/2$ (30 ↔ 80 m/s)

Entropie et “Dumilé” ? (Marquet JAS-2017)

Calcul du travail mécanique ? (pour ce cycle de Carnot + Dumilé)

$$W = \boxed{- \oint \frac{dp}{\rho}} = \boxed{\oint T ds} + \boxed{\oint (\mu_v - \mu_d) dq_t} \quad (\text{par unité d'air humide})$$

$$W_{(d)} = \boxed{- \oint \frac{dp}{\rho_d}} = \boxed{\oint T d\left(\frac{s}{q_d}\right)} + \boxed{\oint g_v dr_t} \quad (\text{par unité d'air sec})$$

Des résultats fort différents ! “+55” % ↔ “+38” % – “-23” %

$W/M11$	$= \oint T ds$	$+ \oint (\mu_v - \mu_d) dq_v$
455	870	-371
$W_{(d)}/P11$	$= \oint T d(s/q_d)$	$+ \oint g_v dr_v$
703	1201	-458

- Conséquence : un très gros impact de $\rho_d/\rho = q_d = 1 - q_t = 1/(1 + r_t)$!
- Explication : vision “par ρ_d ” \Rightarrow calcul de g_v et évite de calculer $(\mu_v - \mu_d)$ et donc les valeurs de références pour s et $(\mu_v - \mu_d)$...
- Mais : vision “par ρ_d ” ne répond pas à la question W ? et “ ϕ/ρ_d ” et “ e_{kin}/ρ_d ” ?
- Proportions : $(703/1201) = 0.59 \neq (455/870) = 0.52$
et $(703/458) = 1.5 \neq (455/371) = 1.23$?

Entropie et “Dumilé” ? (Marquet JAS-2017)

Calcul du rendement ? (pour ce cycle de Carnot + Dumilé)

$$\chi = \frac{Q}{Q_{in}} \quad \text{avec} \quad Q = \oint \delta Q \quad ; \quad Q_{in} = \oint \delta Q^+ \quad ; \quad \delta Q^+ = \max(0, \delta Q)$$

$$Q = W = \oint_1 \left(dh - \frac{dp}{\rho} \right) = \oint_2 [T ds + (\mu_v - \mu_d) dq_t] .$$

Des résultats assez différents : 0.022 → 0.034 ⇒ +57" % !

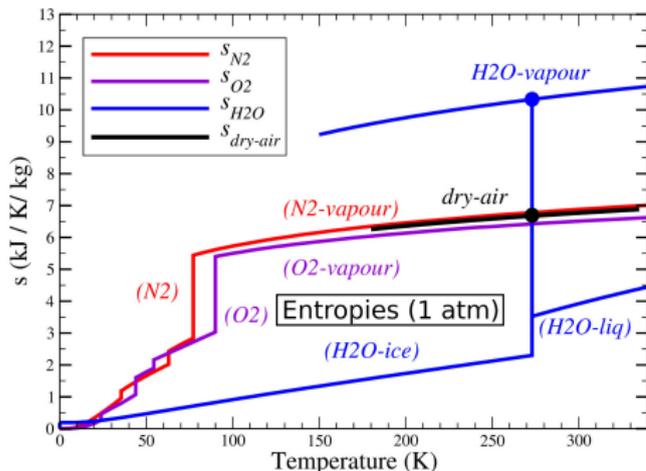
$Q_1 = 455$	$Q_{in/1} = 22114$	$\chi_1 = 0.021$
$Q_2 = 499$	$Q_{in/2} = 22150$	$\chi_2 = 0.023$
$Q_{1(d)} = 703$	$Q_{in/1(d)} = 21833$	$\chi_{1(d)} = 0.033$
$Q_{2(d)} = 743$	$Q_{in/2(d)} = 21871$	$\chi_{2(d)} = 0.035$

- Explication : incertitude sur Q_{in} qui dépend des valeurs de référence pour les enthalpies et entropies, via δQ^+ !

L'entropie de l'air humide ? (QJ-2011)

Le troisième principe de la thermodynamique ?

- Nernst (1906) + Planck (1917) + thermo-stat. & Méca-Q. (années 1930)
→ l'entropie de tous les solides à 0 K est une constante, posée égale à 0.
- Météo : $s(\theta_l)$ & $s(\theta_e)$ Betts (1973) + approx. + $q_t = q_v + q_l + q_i = \text{const}$
- Hauf & Höller (1987) ; Marquet (2011) : $s(\theta_s)$ sans approx. et q_t variable



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

$$\rightarrow \theta_l \approx \theta \exp(-9 q_l)$$

$$\rightarrow \theta_e \approx \theta_l \exp(9 q_t)$$

$$\theta_s \approx \theta_{s1} \approx \theta_l \exp(6 q_t)$$

Paradigme de la turbulence :

Sc + selon Richardson (1919) : une tendance à homogénéiser l'entropie humide, et donc $s(\theta_s)$ si q_t varie !

Entropies de référence : 3ème principe (Marquet JAS-2017)

Entropie à (T, p) : (1) calorimétrie ; (2) Phys-Stat + M.Q.

$$(1) \quad S(T, p) = S(T=0, p) + \int_0^T C_p(T) \frac{dT}{T} + \sum_k \frac{L(T_k)}{T_k},$$

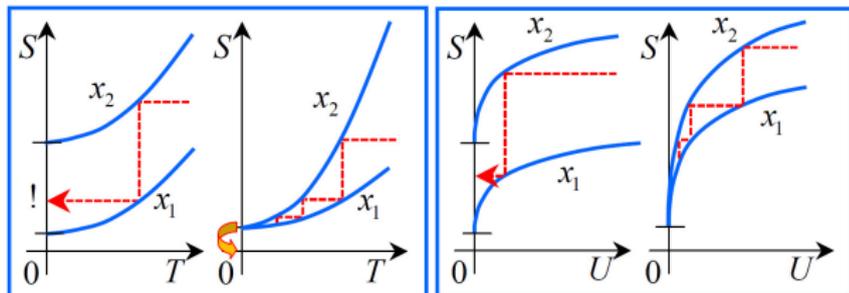
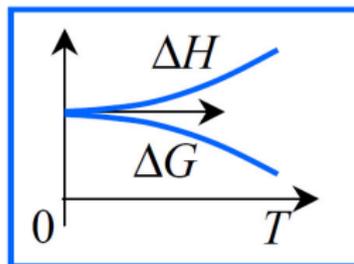
$$(2) \quad S(T, p) = R \frac{\partial}{\partial T} [T \ln(Z)]_V ; \quad \text{où } Z = \text{fonction de partition.}$$

Un bon accord entre les valeurs théoriques et expérimentales !

	C98/Sat.	GR96/Stat.	GR96/Cal.	M15/Cal.
Ar	37.000 ± 0.001	37.00	36.96 ± 0.2	
O ₂	49.031 ± 0.008	49.02	49.12 ± 0.1	49.7 ± 0.4
N ₂	45.796 ± 0.005	45.78	45.94 ± 0.2	46.0 ± 0.2
H ₂ O	45.132 ± 0.010	45.12	44.31	45.2 ± 0.1
CO ₂	51.098 ± 0.029	51.09	51.13 ± 0.1	

C98 : Chase (1998) ; GR96 : Gokcen and Reddy (1996) ; M15 : Marquet (2015)
... Stat : déjà dans Kelley (1932) et Gordon and Barnes (1932, 1934, 1935)

Entropie : principe d'innatteignabilit  du zéro absolu



Nernst (1906):

$\Delta H \rightarrow 0$ if $T \rightarrow 0$ K;
and ΔG tangent to ΔH

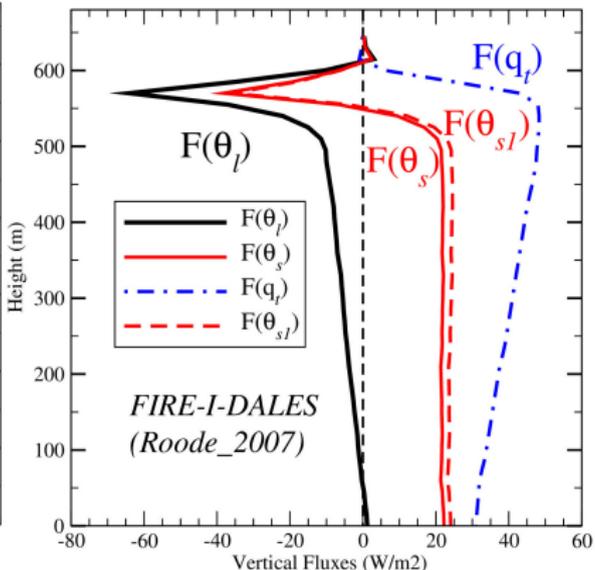
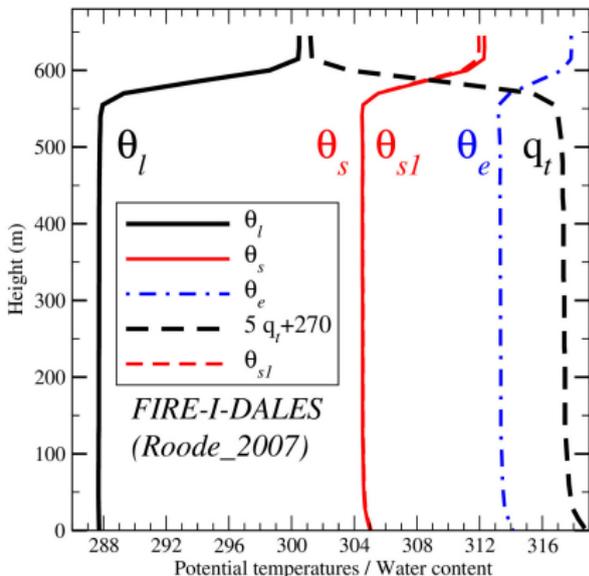
Planck (1911→17):

- 1) $S \rightarrow S_0$ for all solids when $T \rightarrow 0$ K
- 2) set $S_0 = 0$ without loss of generality

Solvay (1911) Einstein -> Nernst (1912):

$C \propto T^3 \Rightarrow U \propto T^4$ and $S \propto T^3 \Rightarrow S \propto U^{3/4}$
It is impossible to reach 0 K in a finite number of step and in a finite lapse of time (the principle of unattainability of $T = 0$ K; "Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunktes")

L'entropie & Sc-marins : une LES de FIRE-I



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

$$\rightarrow \theta_l \approx \theta \exp(-9 q_l)$$

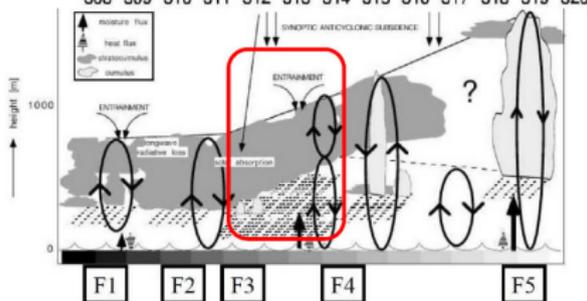
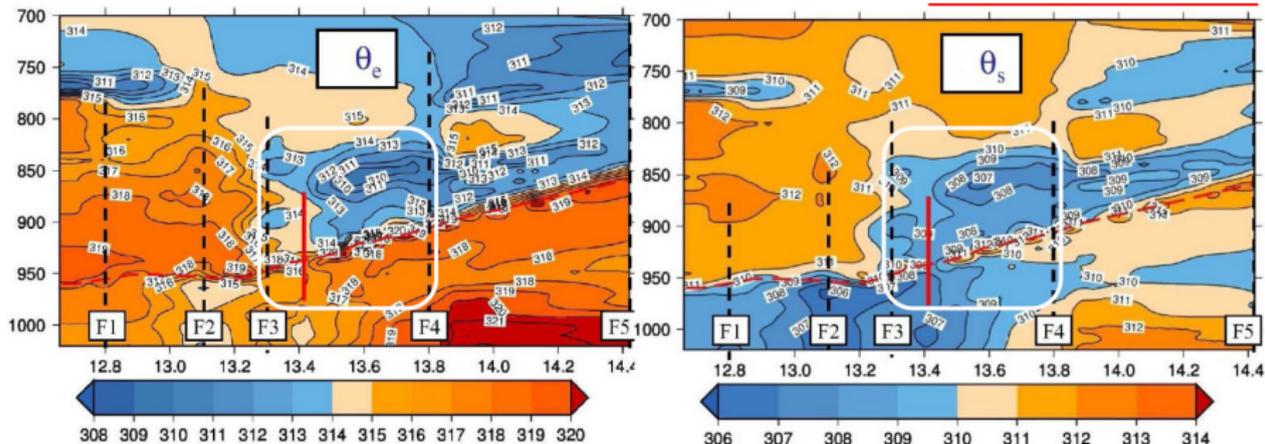
$$\theta_{sl} \approx \theta_l \exp(6 q_t)$$

$$\rightarrow \theta_e \approx \theta_l \exp(9 q_t)$$

Résultat (in)attendu :

\approx constance de $F(\theta_s)$ alors que $F(\theta_s)$ et $F(\theta_{sl})$ varient avec z !

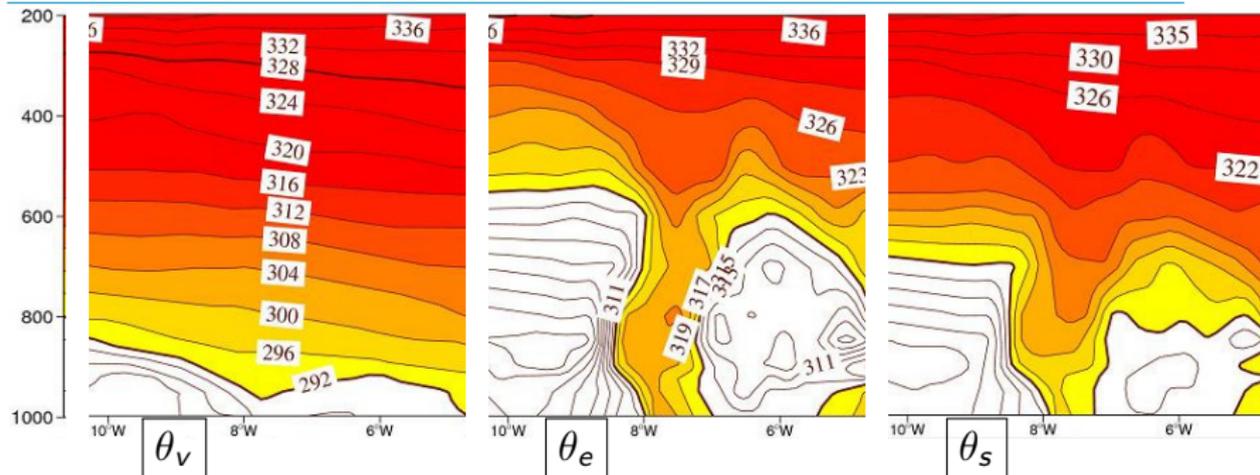
L'entropie et transition Sc \rightarrow Cu



ASTEX-Lag. (43 RS ; Bretherton 1995)

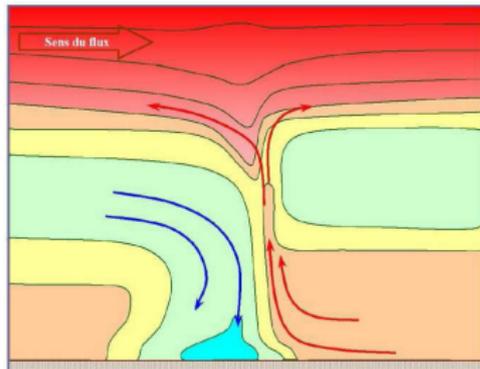
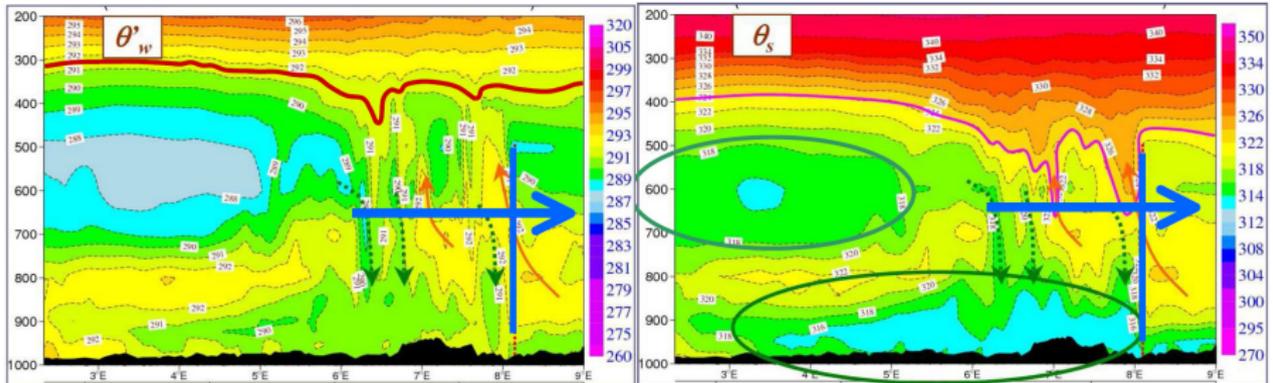
- F1 \rightarrow F3 = Stratus ; F4 \rightarrow F5 = Cumulus
- F3 \leftrightarrow F4 = Strato-Cumulus (boxes)
- inversion "transparent" en θ_s pour Sc !
- inversion > 0 en θ_s pour St, versus < 0 en θ_s pour Cu : critère objectif de différenciation des régimes ?

L'entropie dans les fronts ? (2012 ... QJ-2014)



- $\theta_v \approx$ constante dans la basse CLP, puis \nearrow monotone avec z ;
- θ_e ou $\theta'_w \approx$ constante dans le front, \searrow dans la CLP, \nearrow au dessus, avec une "aspiration" des isentropes entre 300 et 600 hPa ;
- $\theta_s \approx$ constante dans la CLP (turbulence), puis \nearrow au dessus, avec une "aspiration" des isentropes jusqu'à 850 hPa

L'entropie dans les lignes de grains



L'enthalpie h : $L_v(T)$, $L_s(T)$, $L_h(T)$?

