

# Étude de l'énergétique de l'air humide et des paramétrisations physiques de l'atmosphère.

**Soutenance pour l'obtention d'une H.D.R. de l'I.N.P. Toulouse.**

Devant le jury composé de :

• Olivier Thual	Correspondant	INP Toulouse
• Jean-Pierre Chaboureau	Rapporteur	LA-OMP Toulouse
• Frédéric Hourdin	Rapporteur	LMD-UPMC Paris
• Rémi Tailleux	Rapporteur	Université de Reading
• Jean-Luc Redelsperger	Examineur	LOPS Plouzané
• Laurent Terray	Examineur	CERFACS Toulouse

par Pascal MARQUET *Météo-France CNRM-GMAP*  
à Toulouse, le 28 juin 2016

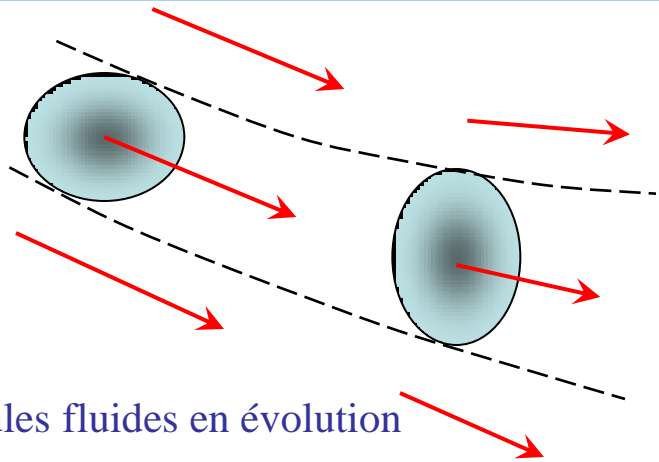


**METEO  
FRANCE**



# Introduction / mes travaux : prévision numérique

## ◆ La “mécanique des fluides” :



- Particules fluides en évolution
- Grandeurs “spécifiques” (par unité de masse)

## 1) paramétrisations physiques :

$$\frac{\partial(X)}{\partial t} = \underbrace{-\vec{V} \cdot \vec{\nabla}(X)}_{dyn.} + \left( \frac{\partial X}{\partial t} \right)_{phys.}$$

turbulence / convections / micro-physique / ...

## ◆ Des équations :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \vec{\nabla}(\rho) - \rho \operatorname{div}(\vec{V})$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla}(p) - \vec{\nabla}(\phi) + \vec{F}$$

$$p = \rho R T$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \vec{\nabla}(q_k) + \text{Sources} - \text{Puits}$$

- Gaz parfaits.

$$\frac{\partial(c_p T)}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \vec{\nabla}(c_p T) + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + \dot{Q}$$

- Énergie / “Enthalpie :  $c_p T$ ” Thermodynamique

## 2) enthalpie / entropie / exergie :

$h?$

$s?$

$"h - T_0 s"?$

(grandeurs “spécifiques”)

(par unité de masse)

# Plan

1

• Parcours Professionnel + Bilan recherche

2

• Exergie / Energie Utilisable (1988-2006 & 2015-2016)

3

• Paramétrisations physiques (1996 - 2008)

4

• Entropie & Enthalpie de l'air humide (2009 - 2016)

5

• Perspectives

# Plan

1

- Parcours Professionnel + Bilan recherche

2

- Exergie / Energie Utilisable (1988-2006 & 2015-2016)

3

- Paramétrisations physiques (1996 - 2008)

4

- Entropie & Enthalpie de l'air humide (2009 - 2016)

5

- Perspectives

## ***C.V. / Bilan des Activités de Recherche***

◆ **ITM (80-83 prévi 83-86) / IM (86-88) / FCPLR (LMD-X 88-90) / Prévi-NUM (90-91) / Prévi-COMPAS (1991-95) + Thèse (1994) + Prix Prud'Homme (1995) / CNRM-GMGEC (1995-2008) / Prévi-LABO (2008-14) / CNRM-GMAP (2014→22)**

◆ **22 publications (A) :**

- 10 en seul auteur
- 2 en premier auteur
- 10 en co-auteur

◆ **articles (A) + autres + conférences (intern.) :**

- $13 + 8 + 15 = 36$  sur l'énergétique / thermodyn.
- $6 + 7 + 31 = 44$  sur les paramétrisations phys.
- $3 + 3 + 10 = 16$  sur le changement climatique

◆ **co-encadrements – cours :**

- 1 Thèse (98) + 1 en cours
- 6 Stages ITM3-EIENM3-M2
- 2 Post-Doctorats (2000-04)
- 3 cours (ENM 91/93+02/05)

◆ **les projets :**

- Changement Climatique : **RACCS / PROVOST / MERCURE / PRUDENCE / PRISM / ENSEMBLE**
- Param. Phys. : (ARPEGE) / **EUROCS / GCSS / GPCI / RTMIP / AMMA / (EUCLIPSE) / DEPHY2**
- Thermodynamique + Energétique : **COST-ES0905**

# Plan

1

• Parcours Professionnel + Bilan recherche

2

• Exergie / Energie Utilisable (1988-2006 & 2015-2016)

3

• Paramétrisations physiques (1996 - 2008)

4

• Entropie & Enthalpie de l'air humide (2009 - 2016)

5

• Perspectives

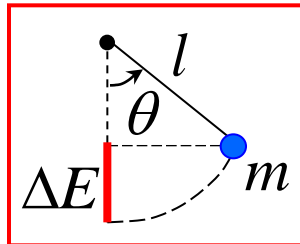
# Exergie = Énergie Utilisable

“énergétique de la mousson africaine” (FCPLR LMD-X 1988-90)

Considérer les “invariants” locaux positifs et  $\approx$  quadratiques : du type  $X^2/2$   
(TEJ + AEJ + Mousson)

$$\Delta E = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

◆ Énergie cinétique :  $\Delta E \approx m v^2 / 2$



◆ Pendule simple :

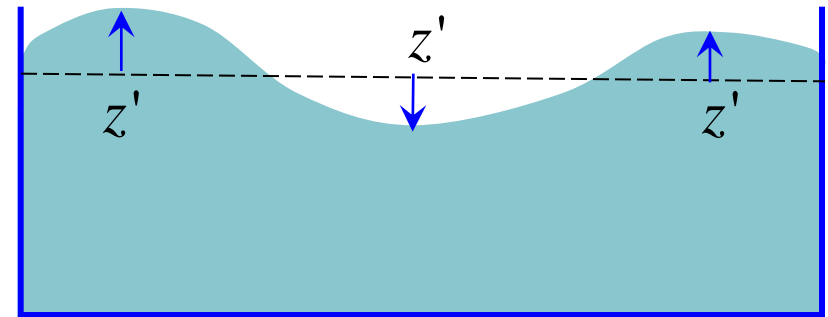
$$\Delta E = m l g [1 - \cos(\theta)]$$

$$\Delta E \approx m l g [\theta^2 / 2]$$

◆ Houle dans un bassin :

$$\Delta E = E - E_{ref} = \iint \rho g \frac{(z')^2}{2} dx dy$$

$z_{ref}$



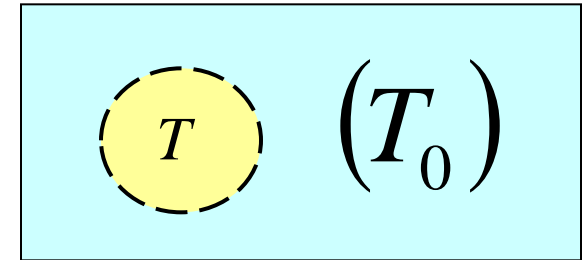
# Exergie = Énergie Utilisable

Et en thermodynamique ? (solides / fluides)

◆ “Puissance motrice du feu” (Carnot / 1824) = une “énergie utilisable” ! (une exergie)

◆ William Thomson (Lord Kelvin / 1849-53)

“Motivity” :  $\Delta E = c_p \left[ (T - T_0) - T_0 \ln(T / T_0) \right]$   
 $\Delta E \approx (c_p / T_0) \left[ (T - T_0)^2 / 2 \right]$



◆ Thomson 1848

→ T absolue

◆ Rankine 1855

Clausius 1865

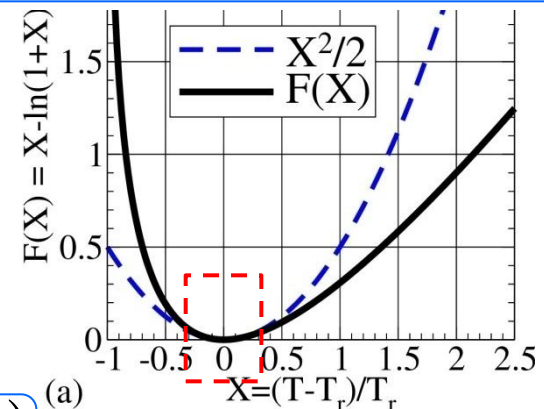
→ entropie

◆ Gibbs (1873) / Maxwell (1871-85) :

$$A = (e - e_0) - T_0 (s - s_0)$$

$$A = (h - h_0) - T_0 (s - s_0)$$

$$X = (T - T_0) / T_0 \quad F(X) = X - \ln(1 + X)$$

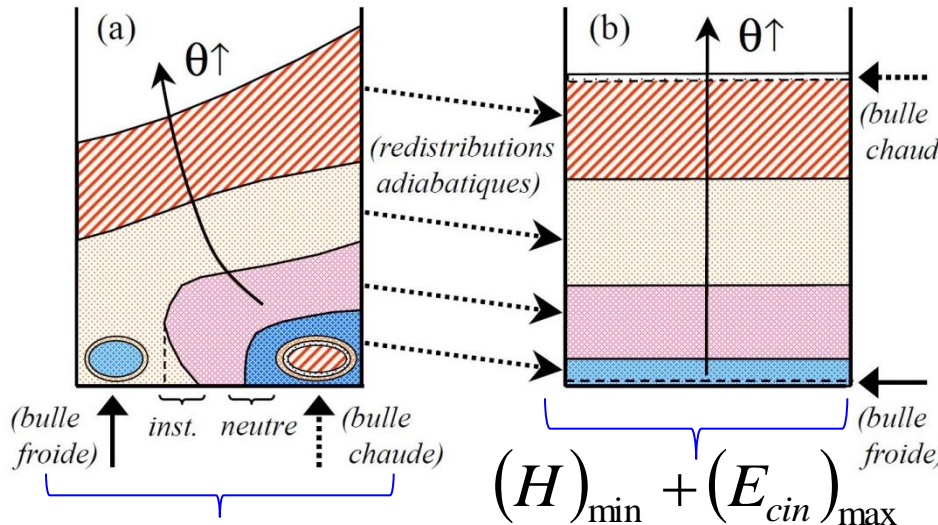




# APE = Énergie Potentielle Utilisable

*Et en Météorologie : Margules (1905) ; Lorenz (1955)*

*(pas de références aux travaux du 19ème siècle en thermodynamique)*



◆ Analogie avec le pendule simple et la houle dans un bassin

$$(E_{int} + E_{pot}) + E_{cin} \approx (H) + E_{cin}$$

$$H + E_{cin} \approx (H)_{min} + (E_{cin})_{max}$$

$$[(E_{cin})_{max} - E_{cin}] \equiv APE \approx H - (H)_{min}$$

$$H + E_{cin}$$

$$APE = \frac{c_p}{(1+\kappa)p_0^\kappa} \int \left[ (\overline{p^{1+\kappa}}) - (\bar{p})^{1+\kappa} \right] \frac{d\theta}{g}$$

$$APE \approx \int \frac{1}{\Gamma_d - \bar{\Gamma}} \frac{(\overline{T'})^2}{2\bar{T}} dp$$

- ◆ mais des approximations :  $E_{int} + E_{pot} \neq H$  !
- ◆ l'état avec  $(H)_{min} + (E_{cin})_{max}$  n'existe pas !
- ◆ pas de sur-adiabatisme !
- ◆ pas d'humidité !

# ***APE* → *Exergie* → Enthalpie Utilisable**

*d'après Kelvin, Maxwell, Gibbs, ...*

*et ≈ Dutton (1973) ou Pearce (1978) :*

$$A_h = (h - h_0) - T_0 (s - s_0)$$

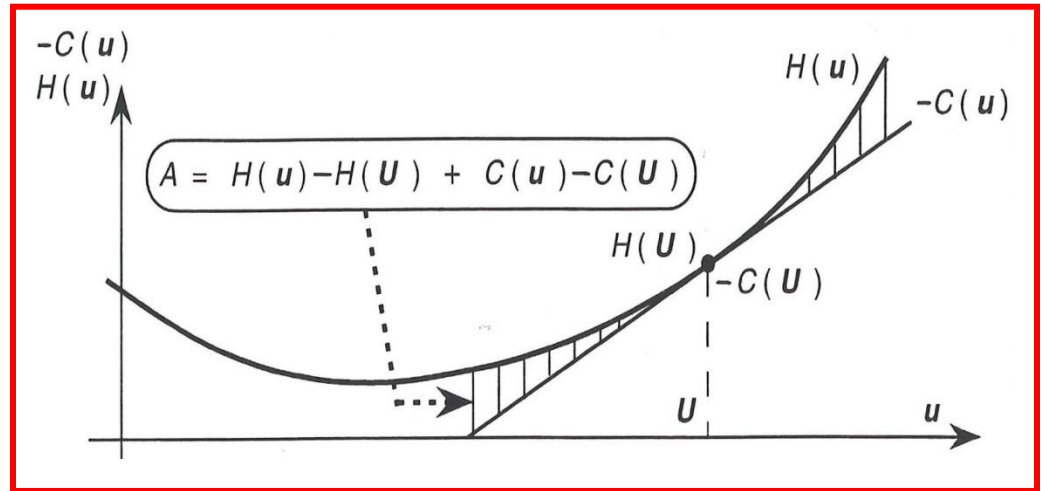
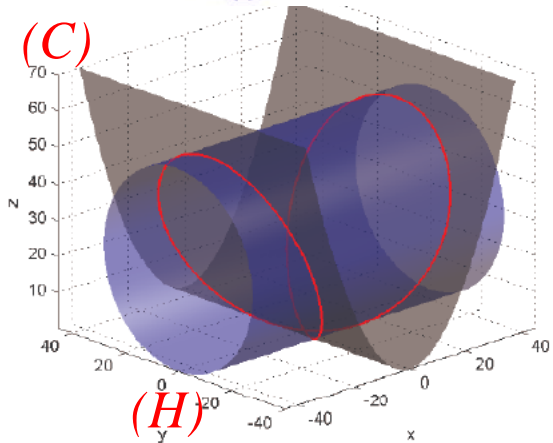
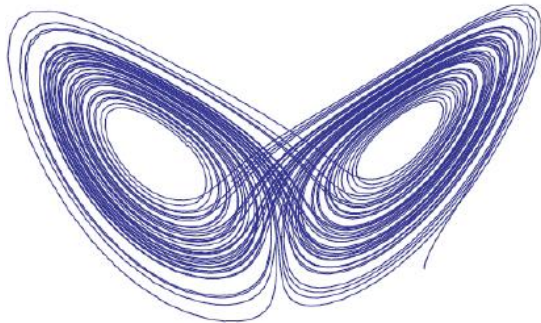
(« enthalpie » car fluide en mouvement)

- ◆ Articles : **CRAS (1990) ; QJRMS (1991)**
- ◆ Une généralisation "humide" : **QJRMS (1993)**
- ◆ **Thèse (1994) ; Prix Prud'Homme (1995)**

- ◆ Invariants de Casimir ; pseudo-energy Shepherd (**QJ95**)
- ◆ Ondes baroclines / FASTEX : **QJRMS (2003a,b)**
- ◆ Une application à un cas de "2xCO2" : **2006** (non-pub.)
- ◆ Une "norme humide" : **2005** (non-pub.) → **2015 (WGNE)**

# Pseudo-Energy – Shepherd / QJ-1995

## ◆ Invariants de Casimir & pseudo-energy T. Shepherd



◆ L'énergie / Hamiltonien :  $h$

◆ Les Casimirs :  $C = -T_0 s$

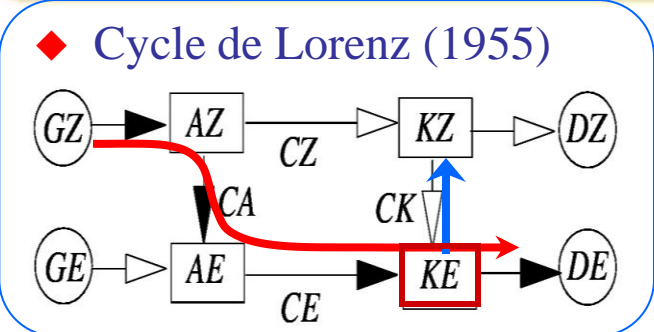
$$A_h = (h - h_0) - T_0 (s - s_0)$$

the conservative Lorenz system

intersection of the  $C$ - and  $H$ -surface.

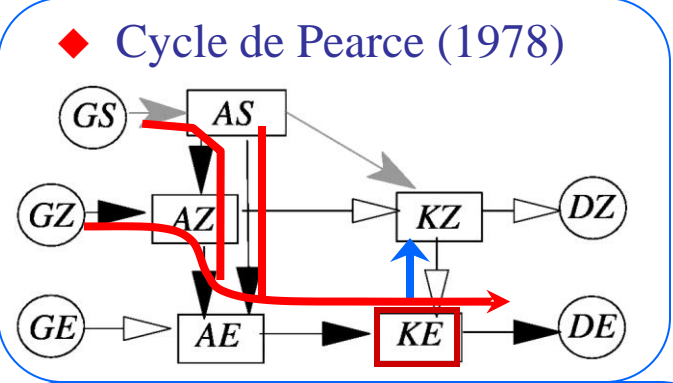
alexander.bihlo@univie.ac.at

# Cycle d'enthalpie Utilisable "A<sub>h</sub>" / QJ-2003(a,b)

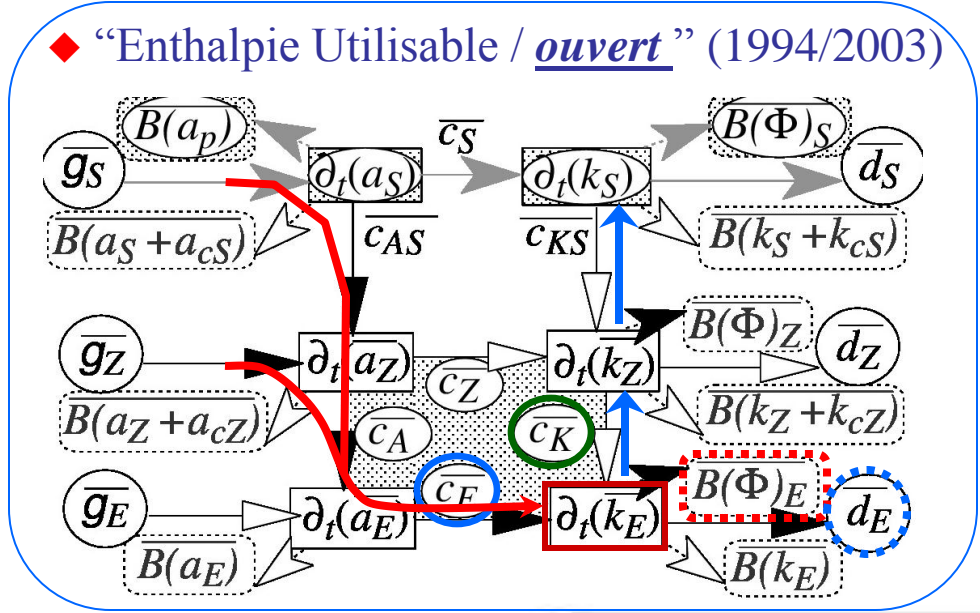
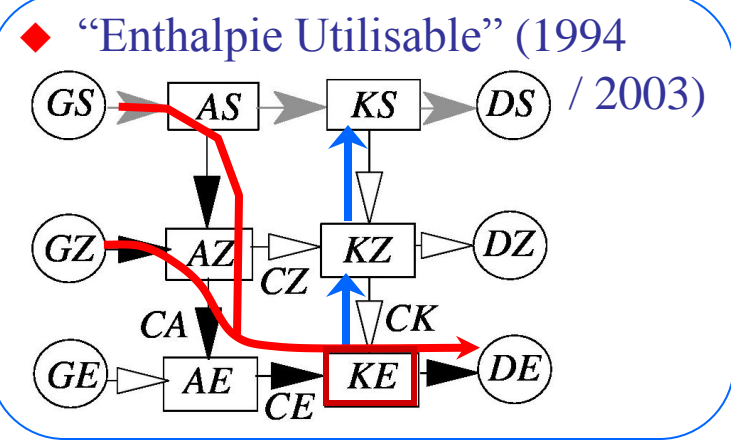


- ◆ AZ / Lorenz = contrastes N/S de T en moy. zonales / (dénom.)
- ◆ AE / Lorenz = pertub = contrastes E/W de T / (dénom.)

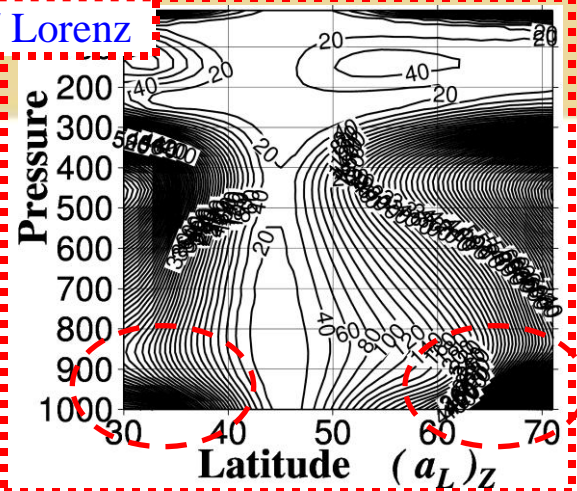
→ : chemin barocline    ↑ : chemin barotrope



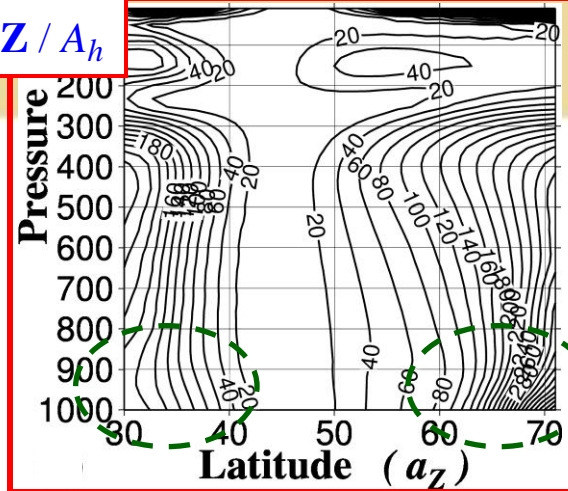
- ◆ AS / Pearce = contrastes verticaux de T en moy. isobale
- ◆ AZ / Pearce = contrastes N/S de T en moy. zonales
- ◆ AE / Pearce = pertub = contrastes E/W de T



**AZ / Lorenz**

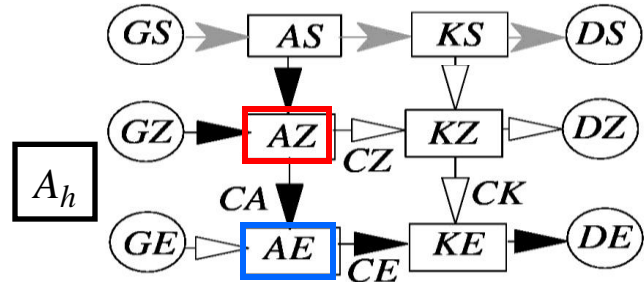
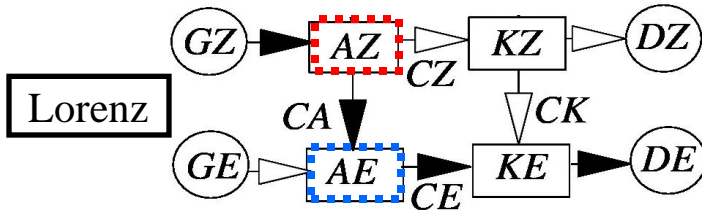


**AZ / A<sub>h</sub>**

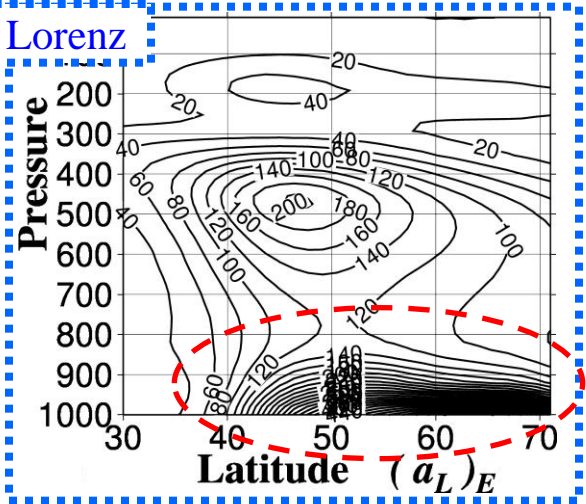


**Cycle de "A<sub>h</sub>"**  
**QJ-2003(a,b)**

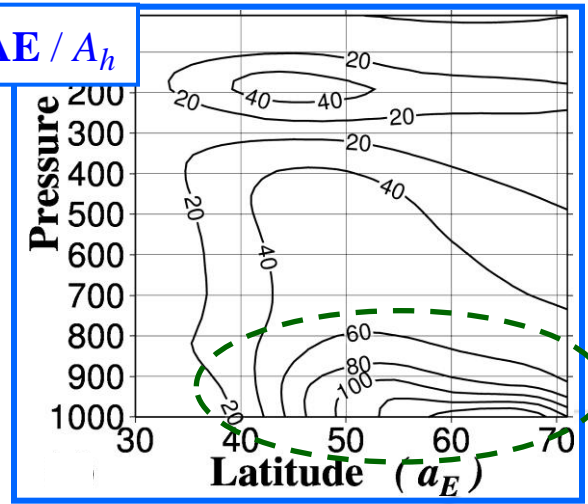
- ◆ Lorenz → A<sub>h</sub>
- moins de problèmes
- valeurs plus réalistes



**AE / Lorenz**



**AE / A<sub>h</sub>**

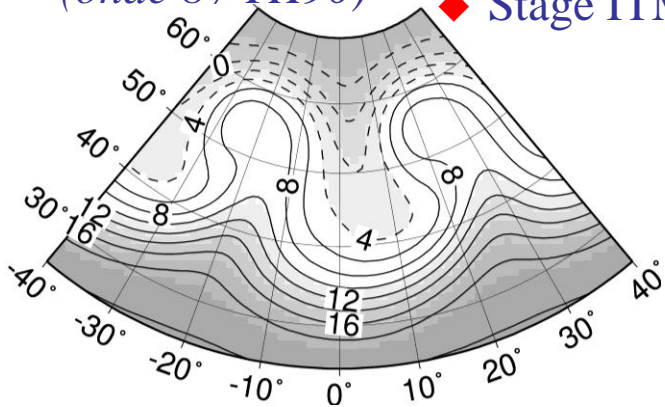


- ◆ Lorenz → A<sub>h</sub>
- moins de problèmes
- valeurs plus réalistes

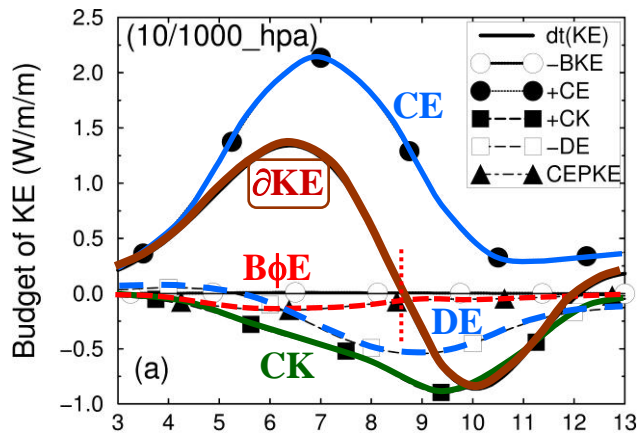
# Ondes baroclines / QJ-2003(a,b) / FASTEX

(onde 8 / TH90)

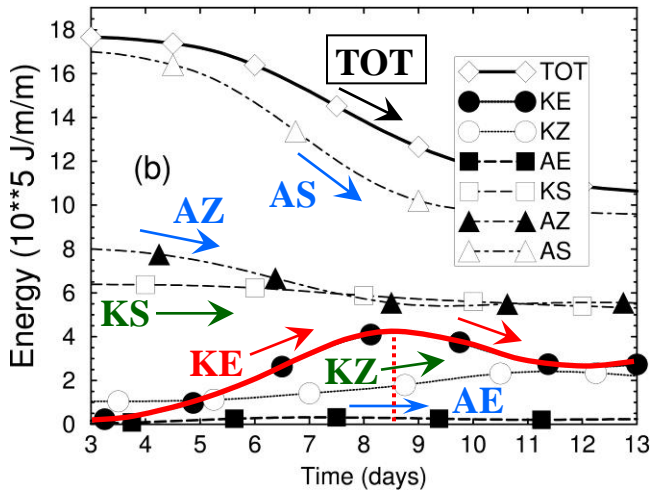
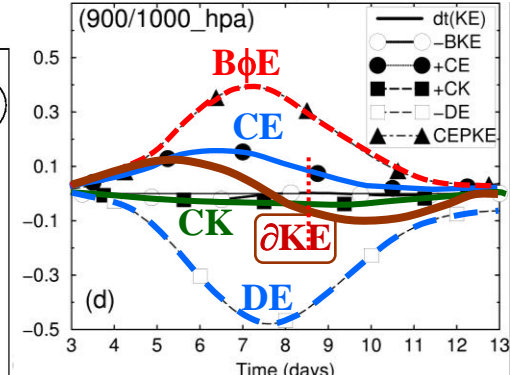
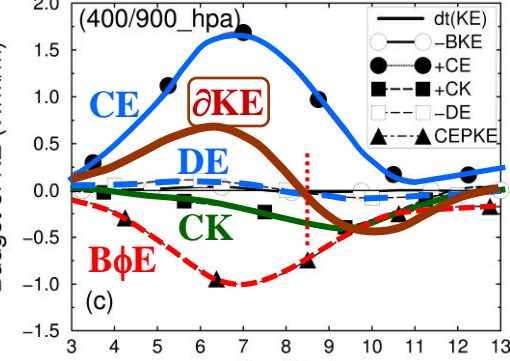
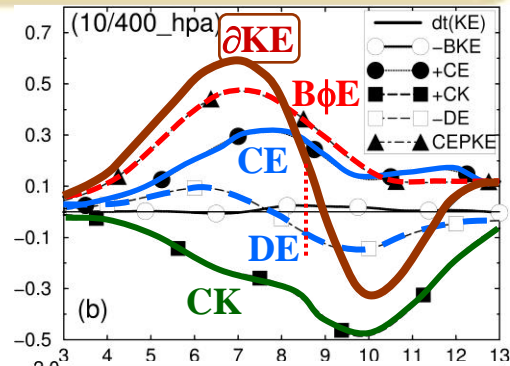
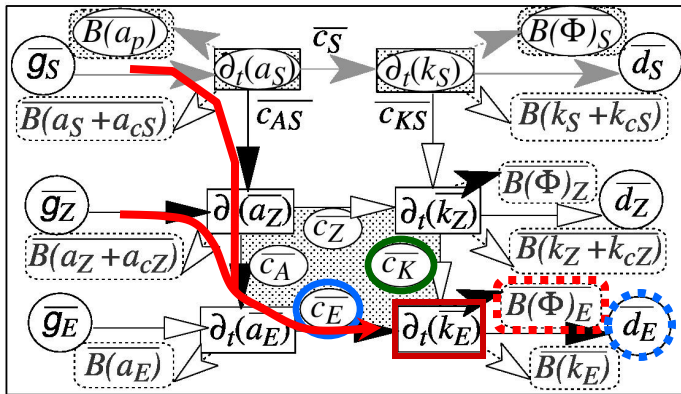
◆ Stage ITM 97 / Ph. Arbogast / S. Malardel



◆ Énergétique globale :  
≈ Lorenz (sauf  $B\Phi E$ )



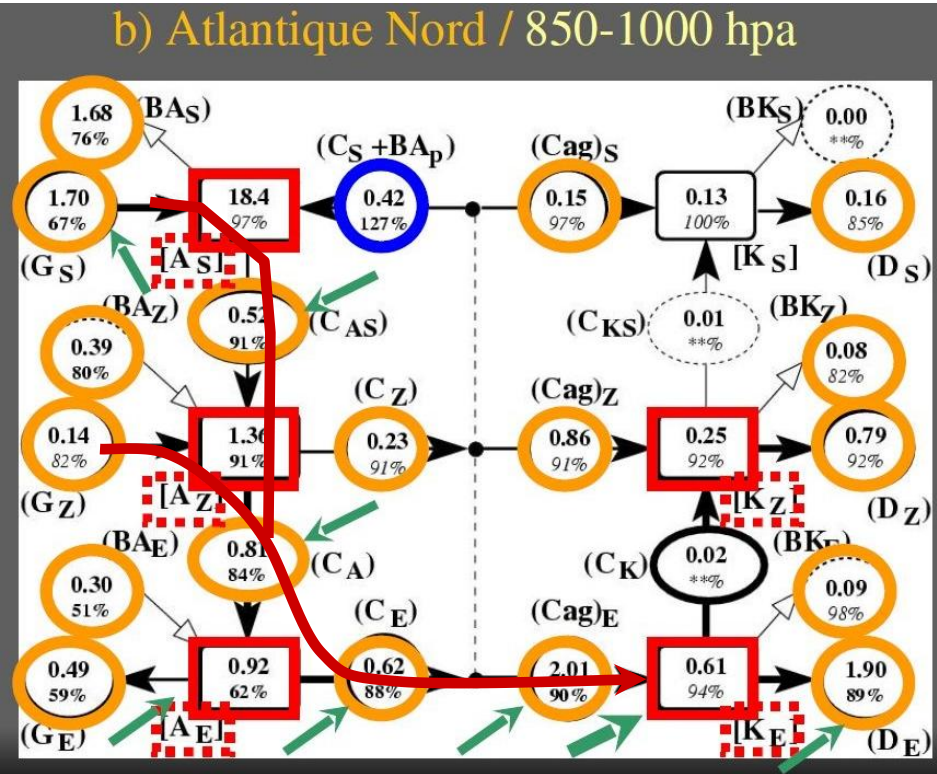
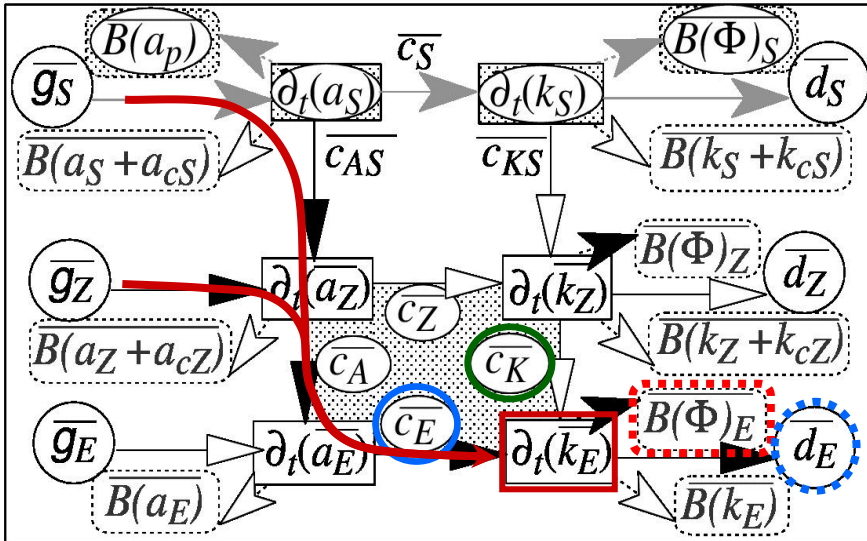
◆ Énergétiques par couches :  
fermé / importance de  $B\Phi E$  !



◆ Instabilité ↑ déferlement ↑  
des ondes baroclines

# Énergétique d'un 2xCO2 ? (AMA-2006)

- ◆ Appliquer le cycle de 2003 à une simulation “2xCO2” (une réunion des possibles)
- ◆ Analyse possible “par couches” selon la verticale :



- ◆ Décroissances (significatives) de GS, CAS, CA, CE, ..., KE, DE !
- ◆ en basses couches / augmentations en altitude : aspect « locaux »

## Les normes "E99" et "MM15"

- ◆ Pourquoi des Normes : produits scalaires / distances / fonc. coût / S.I. / Vect. Sing...
- ◆ L'enthalpie utilisable (*QJRMS 1993*) :  $a_m = h - T_0 s - (\mu_v^0 - \mu_d^0) q_t$
- ◆ après développements / regroupements de  $h$ ,  $s$  et  $q_t$ , /  $F(X) \approx X^2/2$  et  $H(X) \approx X^2/2$

- ◆ j'ai trouvé (2005) une norme humide "MM15" (Marquet Mahfouf WGNE 2015) :

$$N_{MM15} = \frac{1}{2} \left[ \overline{(u')^2 + (v')^2} + \frac{c_{pd} T_0}{[\overline{T(z)}]^2} \overline{(T')^2} + R_d T_0 \overline{\left(\frac{p'_s}{\bar{p}_s}\right)^2} + \frac{R_v T_0}{\bar{r}_v(z)} \overline{(r'_v)^2} \right]$$

- ◆  $\neq$  norme "énergie totale" "E99" (Ehrendorfer et al. JAS 1999, avec  $\varepsilon = 0.1$  à  $10$ ) :

$$N_{E99} = \frac{1}{2} \left[ \overline{(u')^2 + (v')^2} + \frac{c_{pd}}{T_0} \overline{(T')^2} + R_d T_0 \overline{\left(\frac{p'_s}{p_0}\right)^2} + \varepsilon \frac{(L_v)^2}{c_{pd} T_0} \overline{(q'_v)^2} \right]$$

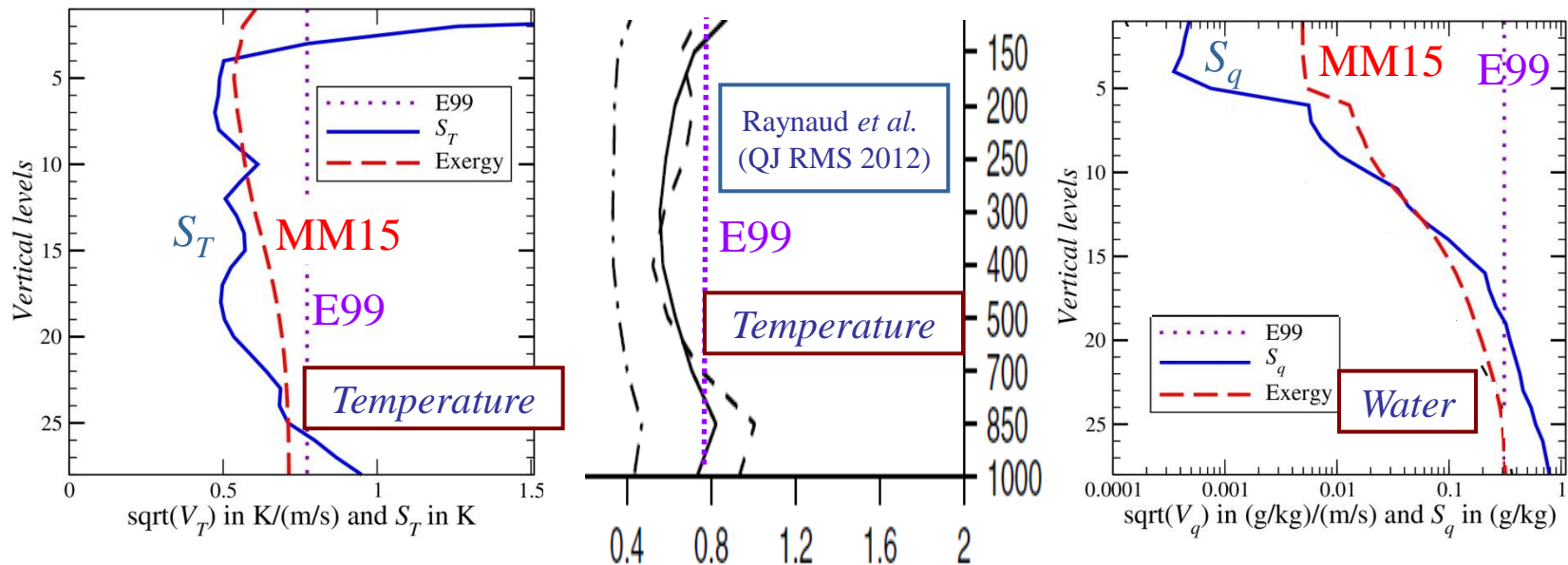
- $a_m$  explique les 3 termes quadratiques ! des « poids » différents pour  $T$  et  $r_v / q_v$
- des « poids » fonctions de  $(z)$  / absence de coefficient de réglage comme  $\varepsilon$  !
- $N$  ne sont pas des "énergies", mais des « énergies utilisables humides »



## Profils verticaux des Normes

$$N = \frac{\overline{(u')^2 + (v')^2}}{V_u} + \frac{S_T^2}{V_T} + \frac{\overline{(p'_s)^2}}{V_p} + \frac{S_q^2}{V_q}$$

→ comparaison des poids pour  $T$  et  $q_v$  avec les “écarts-type d’erreur d’analyse” ( $S$ )



→ variations verticales pertinentes pour MM15 (en rouge), à la fois pour  $T$  et  $\approx q_v$  !  
 → une ressemblance avec les profils de Raynaud *et al.* (2012) /  $\sigma_b$  + erreur modèle

# Plan

1

• Parcours Professionnel + Bilan recherche

2

• Exergie / Energie Utilisable (1988-2006 & 2015-2016)

3

• Paramétrisations physiques (1996 - 2008)

4

• Entropie & Enthalpie de l'air humide (2009 - 2016)

5

• Perspectives

## ***Paramétrisations physiques***

- ◆ 1er article An. Geoph. (1986) : turbulence (L.Mahrt, J.-C. André)
- ◆ GMGEC/EAC : ARPEGE-Climat (13 ans ; code + physique)
  - Turbulence en TKE diag. 2.0 (Ricard-Royer) / 1998 (V3/1999)
  - Turb. en TKE prog. 1.5 (Peridot→ARP) Thèse C. Bossuet (98)
- ◆ GMGEC/EAC : EUROCS (2000-03)
  - Post-Doc : H. Grenier (entraînement sommet couche limite)
  - Cas 1D-verticaux (FIRE-I / ARM-Cumulus) + Coupe-Pacifique

## ***Param. Phys. : versions DIAG → PROG1***

- ◆ GMGEC/EAC : EUROCS (2000-03) / *Cas 1D-vert.* ARM-Cu  
Article QJRMS (*Lenderink et al., 2004*) : nouvelles param. = choix perso.

J'ai conçu en 2002 un assemblage "pronostique"

**"PROG1"** pour le GCM-ARPEGE :

- TKE prog. 1.5 "CBR 2000" (suite thèse C. Bossuet, 1998)
- variance sous-maille humidité (fonctions Bougeault, 1982)
- longueur de mélange non-locale (Bougeault-Lacarrère, 1989)
- convection peu-profonde (Bechtold, 2001)
- schéma micro-phys. Bulk prog. (Lopez, 2002)

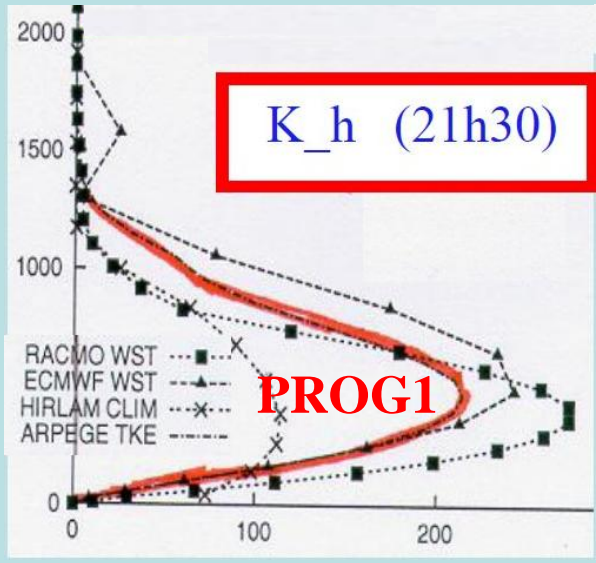
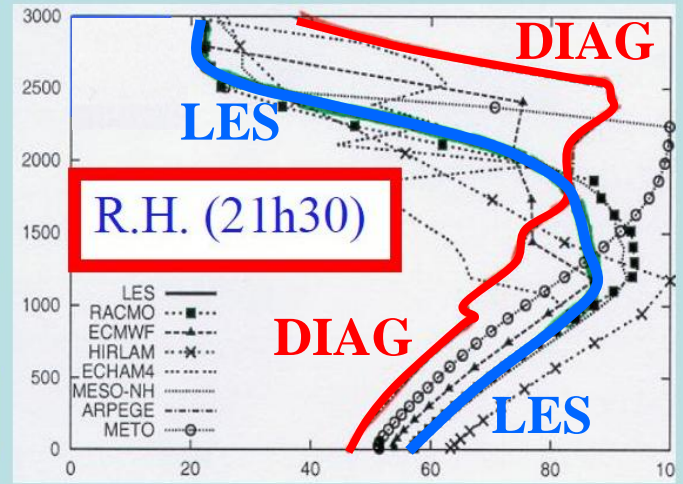
# Param. Phys. : comparaisons DIAG $\leftrightarrow$ PROG1

ARM-Cumulus (Lenderink) (L40 ;  $\Delta t = 5$  mn) :

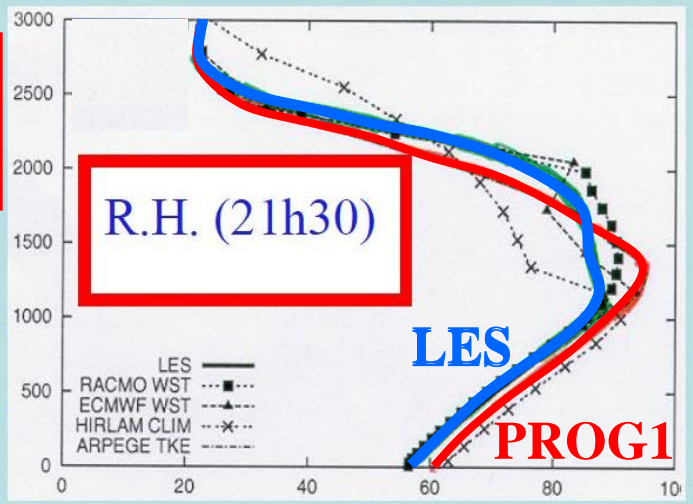
**DIAG / AR4** =  $(\varphi - \mu + TKE - MY)$  diag

**PROG1** =  $(\varphi - \mu + TKE - CBR)$  prog + CV/Becht.

LES / ref = Large Eddy Simulations



Lenderink *et al.* (QJRMS 2004)



## ***Param. Phys. : versions PROG1 → PROG2***

- ◆ GMGEC/EAC : EUROCS → GEWEX (2004-2008)  
GCSS + GPCI *cas 1D (RICO-comp.)* + *Coupe-Pacifique*

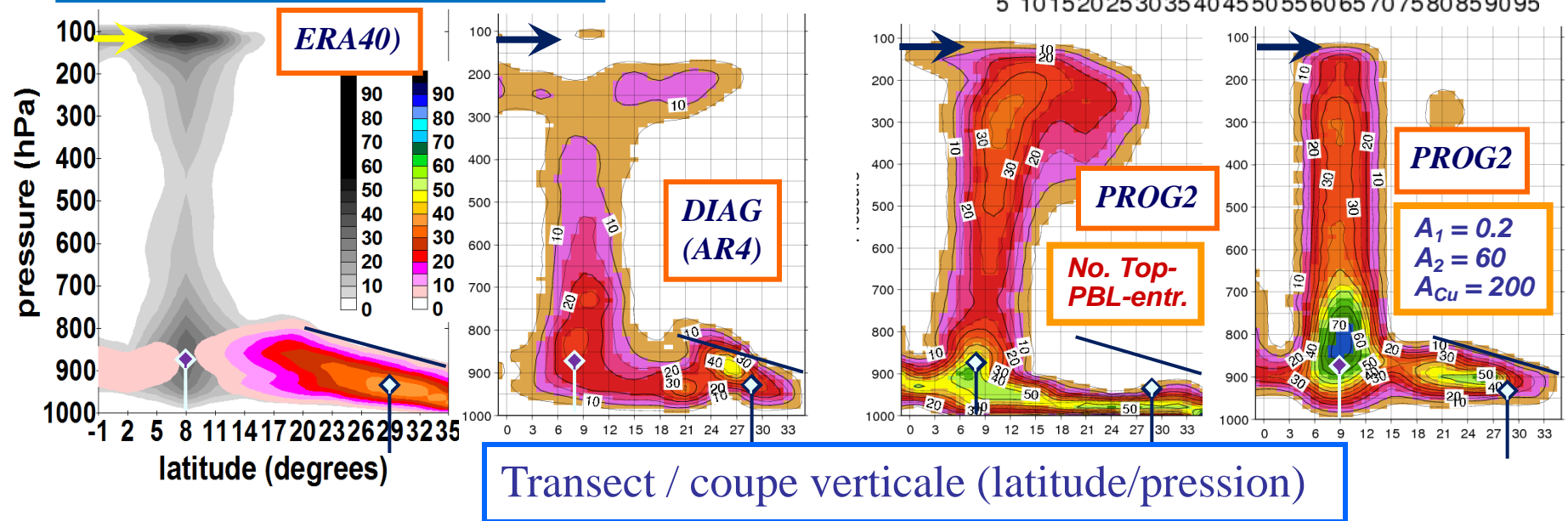
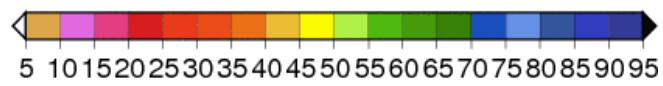
**PROG2** : le même ensemble “pronostique” + des nouveautés :

- TKE *prog.* 1.5 “CBR 2000” (code suite thèse C. Bossuet)
- entraînement en sommet couche limite (H. Grenier)
- variance sous-maille humid. (fonctions Bougeault mixtes)
- longueur de mélange non-locale (Bougeault-Lacarrère, 1989)
- convections peu-prof. + profonde (Gueremy) + “thermiques”
- schéma micro-phys. bulk *prog.* (Lopez 2002) + debug

# Param. Phys. : DIAG ↔ PROG2 + entraînement ?

GEWEX-GPCI (2008)

Nébulosité (%)



- ◆ De vraies améliorations (J. Teixeira) : sommet CVP + CVPP
  - CVP + CVPP Gueremy / Turbulence CBR
  - Réglages du CTEI : ( $A_1 A_2 A_{cu}$ ) / Tuning stage ITM

Teixeira et al. (J. Climate 2011)

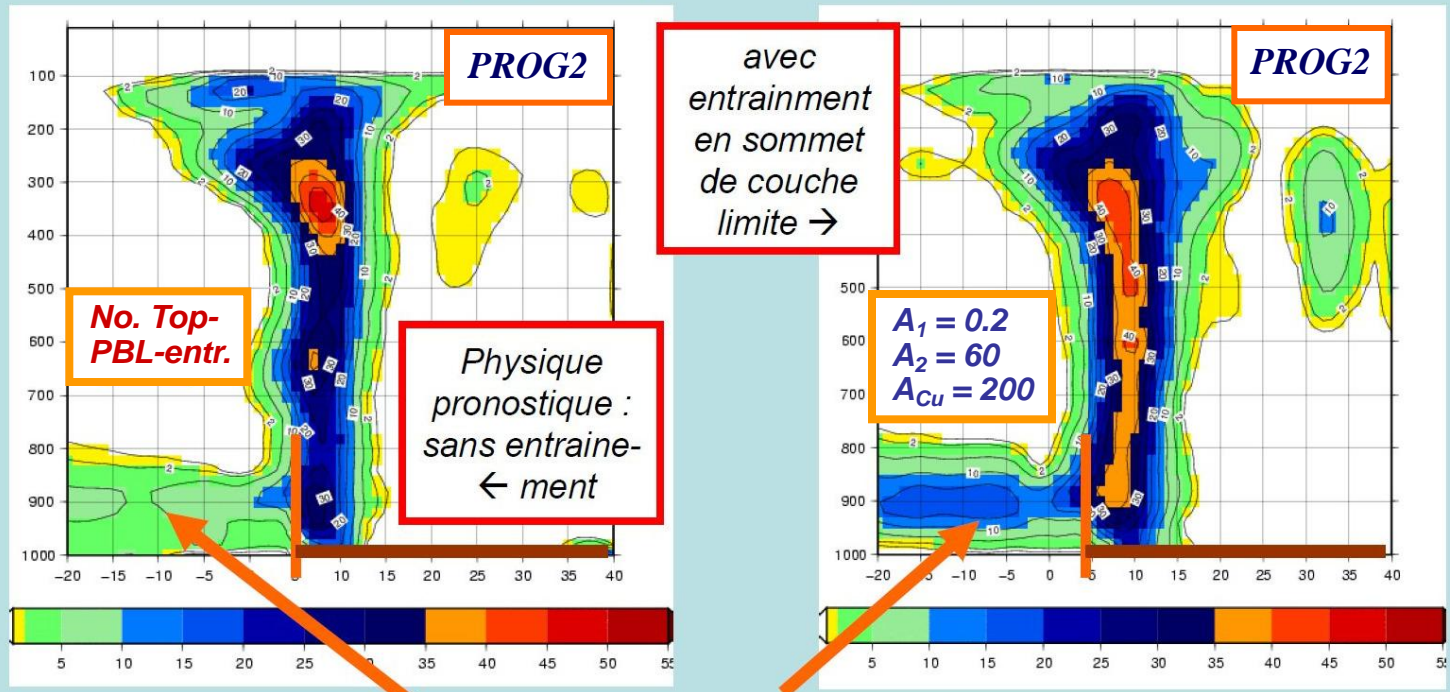
# Param. Phys. : DIAG $\leftrightarrow$ PROG2 + entraînement ?

◆ Transect AMMA ( $\approx$  EPCI GPCI)

Hourdin *et al.* (B.A.M.S. 2010)

ARPEGE-Climat T63 / L31 =  $(\phi - \mu + TKE - CBR)$  prog + CV/Gueremy

AMMA transect (10W-20E) / année 2000-06 / Nébulosité



Meilleurs stratocumulus marins sur le Golfe de Guinée



## ***Paramétrisations physiques : départ de EAC***

◆ Départ du CNRM vers *Prévi/LABO* en 2008 ...

- **GABLS1** (E. Bazile) → **travaux** à GMAP (Lopez / CBR / ...)  
→ car des *biais* (vent,  $T$ ) / des *bugs* / ...
- Stratégie **GCPP** (F. Bouyssel) : conv. Piriou-Gueremy → **PCMT**
- Bascule en 2009 d'une physique  $\approx$  **PROG1** dans ARPEGE-PNT  
(*similaire à celle conçue en 2002 pendant EUROCS*)
- GMAP/GMGEC : dans ARPEGE-CLIMAT / 2016 pour l'**AR6** ?

# Plan

1

• Parcours Professionnel + Bilan recherche

2

• Exergie / Energie Utilisable (1988-2006 & 2015-2016)

3

• Paramétrisations physiques (1996 - 2008)

4

• Entropie & Enthalpie de l'air humide (2009 - 2016)

5

• Perspectives

# L'entropie de l'air humide

Idées 2008/09 ... articles QJRMS (2011) + Blue-Book WGNE (2015, 2016)

$$s = q_d s_d + q_v s_v + q_l s_l + q_i s_i$$

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

→ similaire à Haüf and Holler (1987) : mais avec  $s_{ref}$  et  $c_{pd}$  constants

$\approx \theta_1$  Betts (73) ou  $\theta_{1l}$  Tripoli & Cotton (81)

$$\theta_s = \left[ \theta \exp\left(-\frac{L_v q_l + L_s q_i}{c_{pd} T}\right) \right]$$

$$\exp(\Lambda_r q_t)$$

→ premier ordre

$$\left(\frac{T}{T_r}\right)^{\lambda q_t} \left(\frac{p}{p_r}\right)^{-\kappa \delta q_t} \left(\frac{r_r}{r_v}\right)^{\gamma q_t} \frac{(1 + \eta r_v)^{\kappa(1 + \delta q_t)}}{(1 + \eta r_r)^{\kappa \delta q_t}}$$

→ deuxième ordre

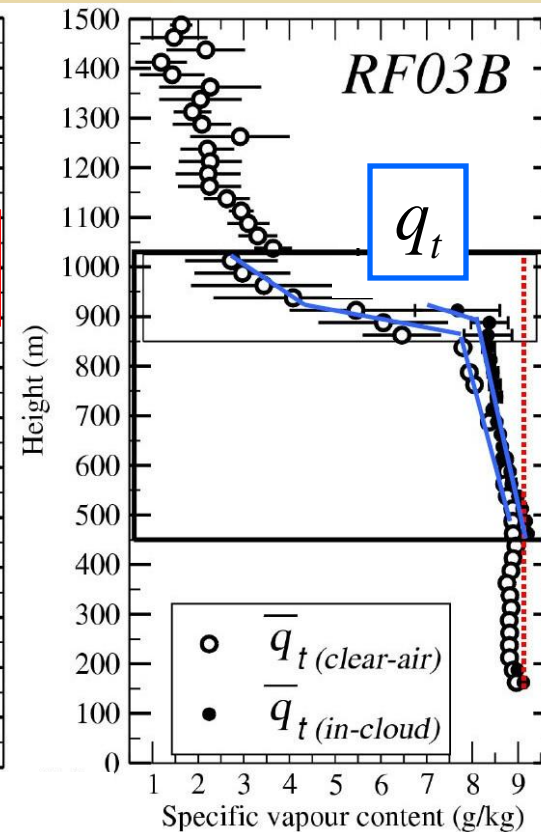
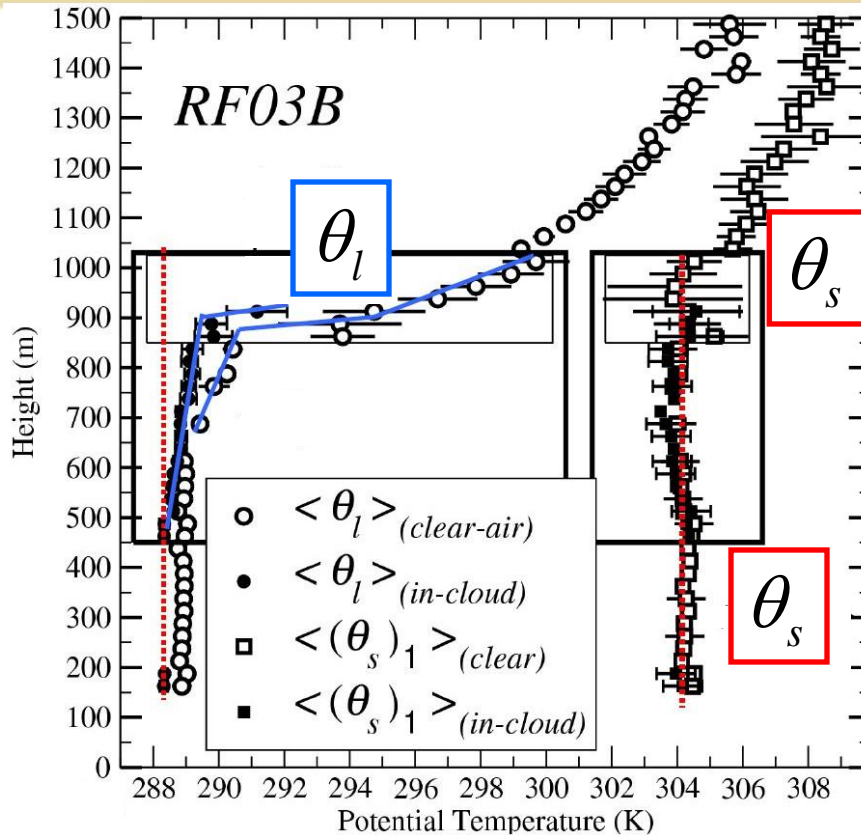
$$(H_l)^{\gamma q_l} (H_i)^{\gamma q_i} \left(\frac{T_l}{T}\right)^{c_l q_l / c_{pd}} \left(\frac{T_i}{T}\right)^{c_i q_i / c_{pd}}$$

→ précipitations à des températures différentes

→ sous-saturation  
ou sur-saturation

$$\Lambda_r = (s_{vr} - s_{dr}) / c_{pd} \approx 6$$

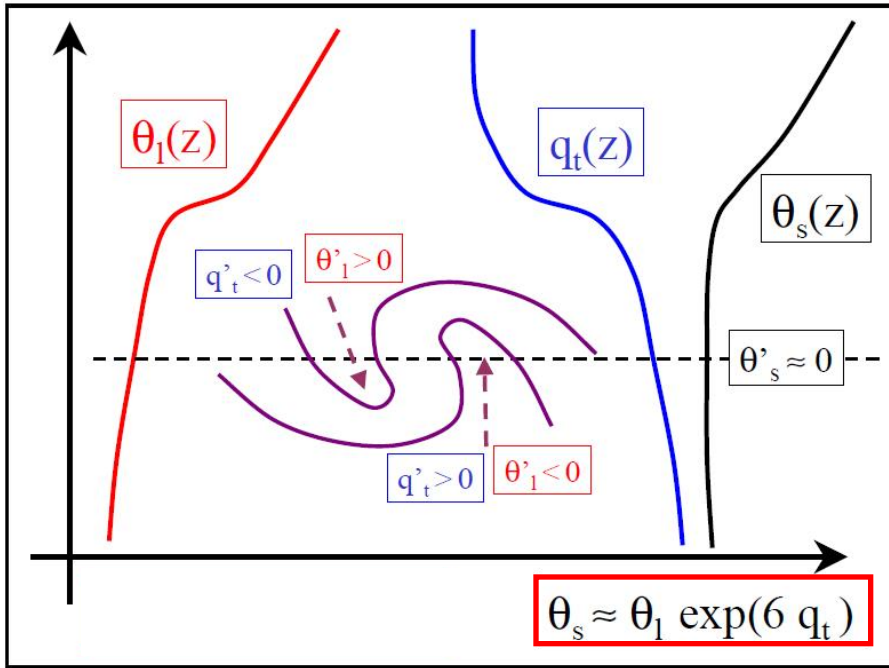
# L'entropie humide : vols avion FIRE-I



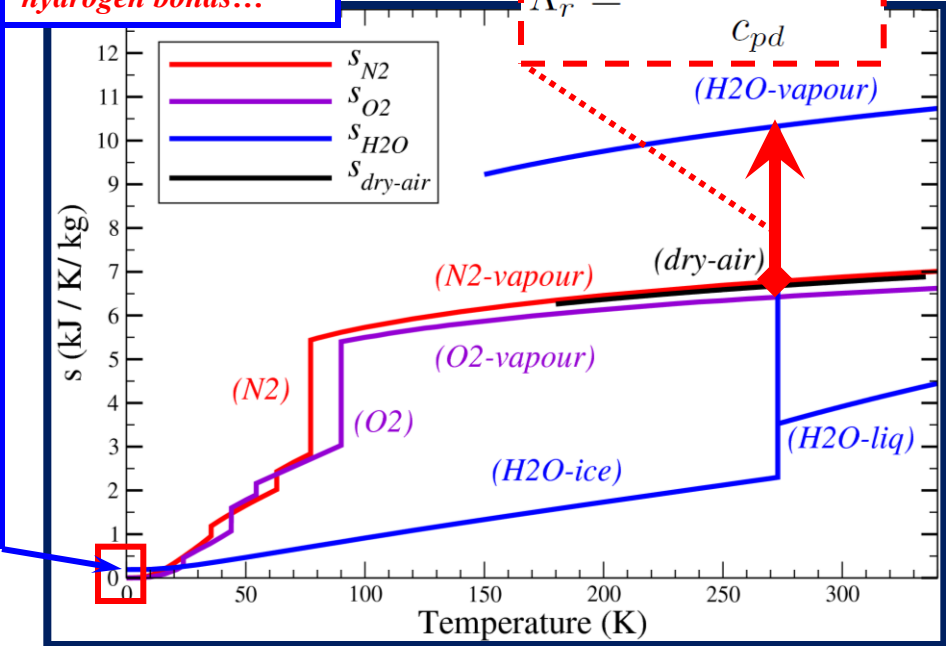
- ◆ Gradients + sauts en “ $\theta_l$ ” et “ $q_t$ ” (Betts, 73) → mais homogène en “ $\theta_s$ ” !
- ◆ Entropie homogène pour les stratocumulus marins ? →  $\approx$  « corps noir » !

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

# L'entropie humide : son flux ?



Residual entropy for water (Pauling) at 0K: hydrogen bonds...

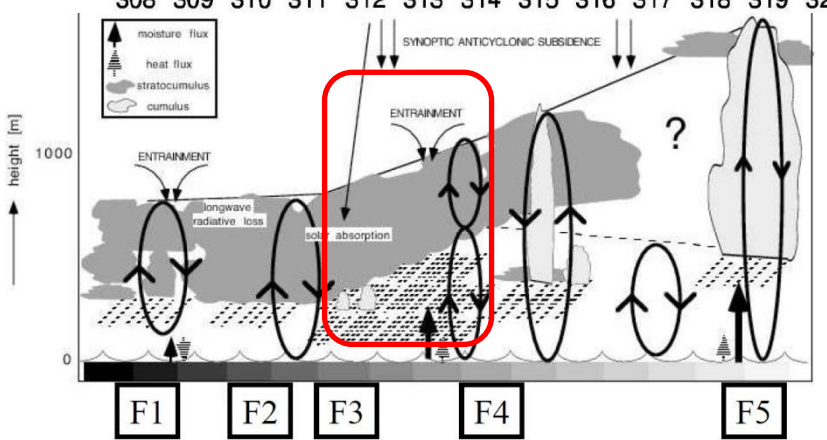
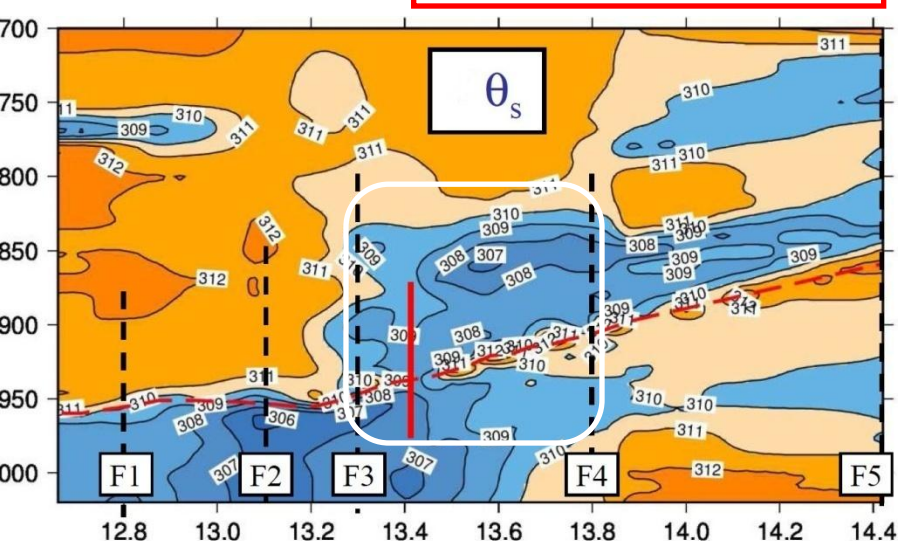
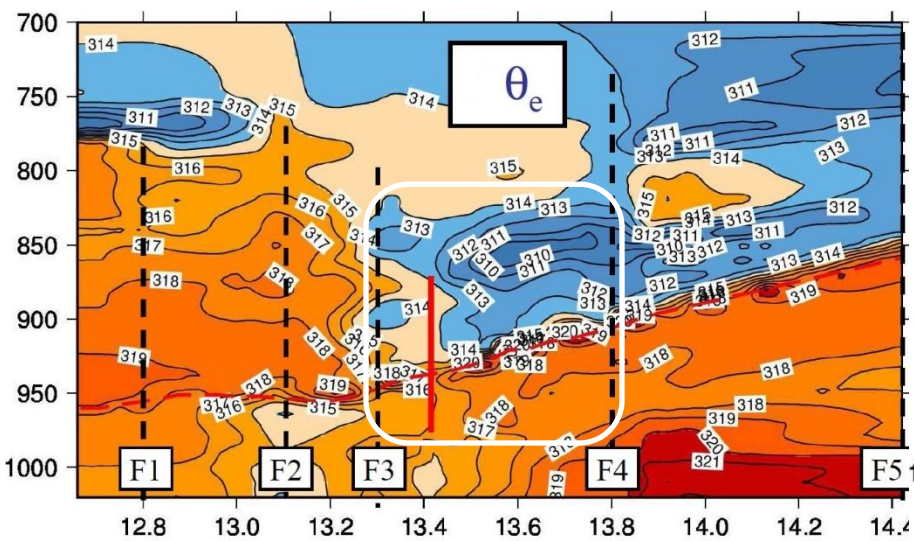


- ◆ Impacts du 3<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique :  $s \approx \text{Cste}$  car  $\Lambda_r \approx 6!$
- ◆ Un besoin de se reposer sur les valeurs expérimentales (comme  $L_{\text{vap}}$ , ...)

# L'entropie humide : EUCLIPSE (2011) / "CTEI" ?

◆ Impacts du 3<sup>ème</sup> principe de la thermo : avec  $\Lambda_r \approx 6!$

$$\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda_r q_t)$$

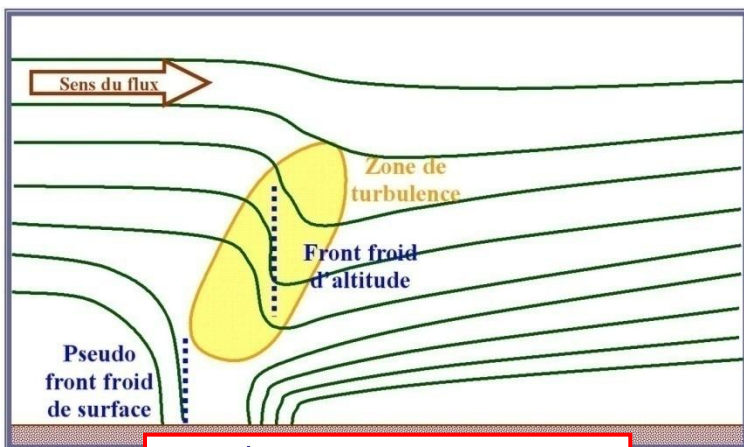
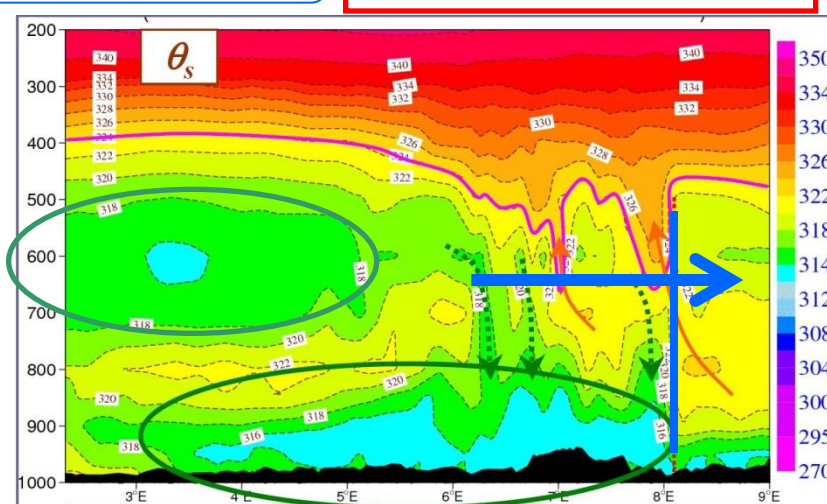
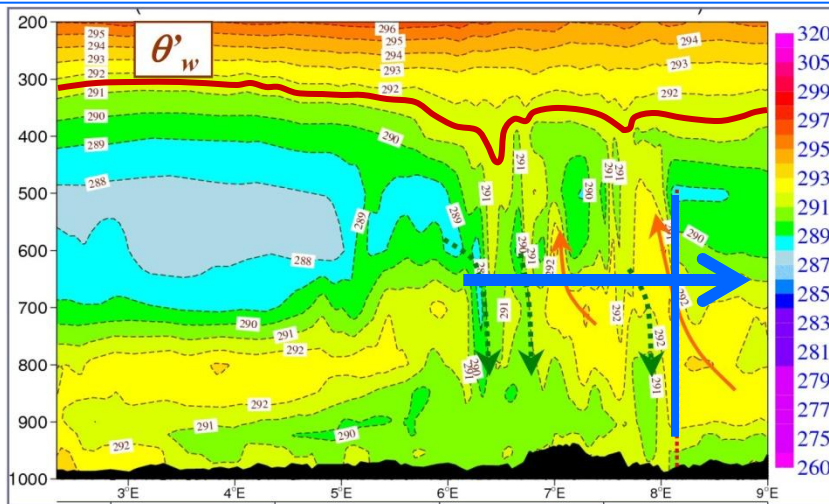


- ◆ visions en  $\theta_s$  ou  $\theta_e$  bien différentes !
- ◆ faibles sauts en  $\theta_s$  entre F3 et F4 !

# L'entropie humide : stage EIENM3 E. Blot (2013)

◆ Impacts du 3<sup>ème</sup> principe de la thermo : avec  $\Lambda_r \approx 6!$

$$\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda_r q_t)$$

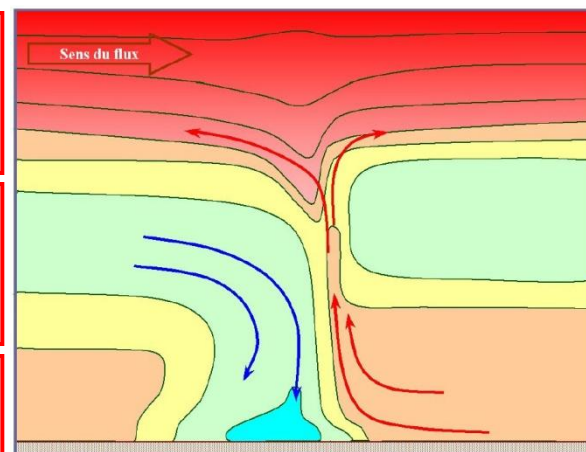


$\theta_s \uparrow$  front dédoublé

$\uparrow \theta'_w$  et  $\theta_s \uparrow$   
ligne de grains  $\rightarrow$

convection :  $\theta_s$   
"aspirées" ?

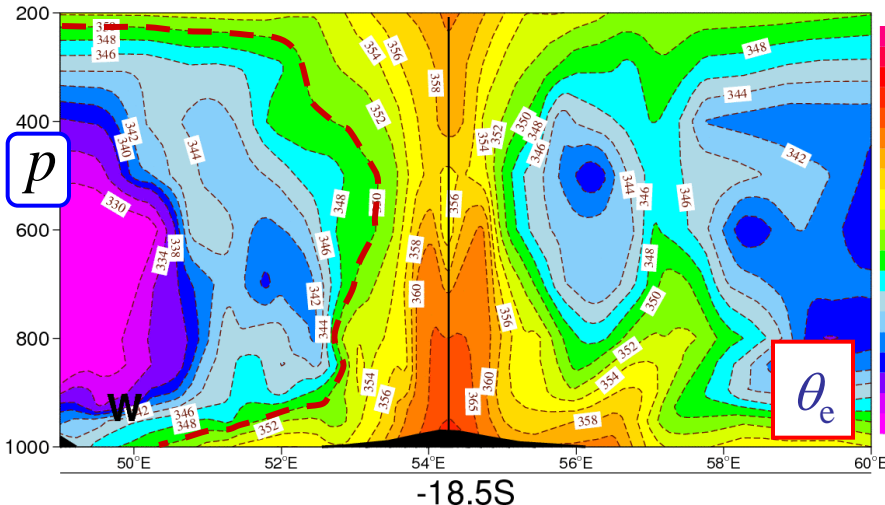
zones froides en  
 $\theta_s$  : mieux vues ?



# L'entropie humide : DUMILE (2013)

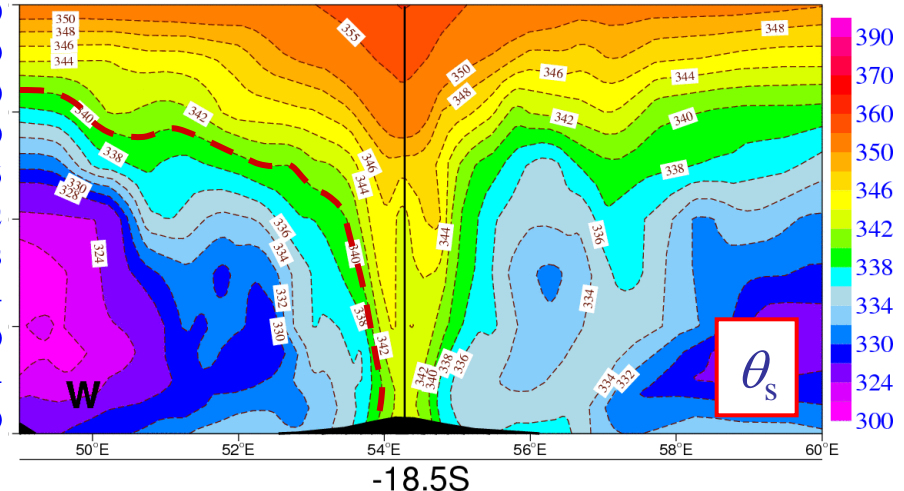
◆ Impacts du 3<sup>ème</sup> principe de la thermo : avec  $\Lambda_r \approx 6!$

$$\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda_r q_t)$$



longitudes

$\uparrow \theta_e$  et  $\theta_s \uparrow$   
Cyclone Dumilé



longitudes

- ◆ Isentropes en  $\theta_s$  fort différentes de celles en  $\theta_e$  ! (aussi en  $\theta'_w$ )
- ◆ Isentropes “aspirées” par la convection (branches ascendantes)

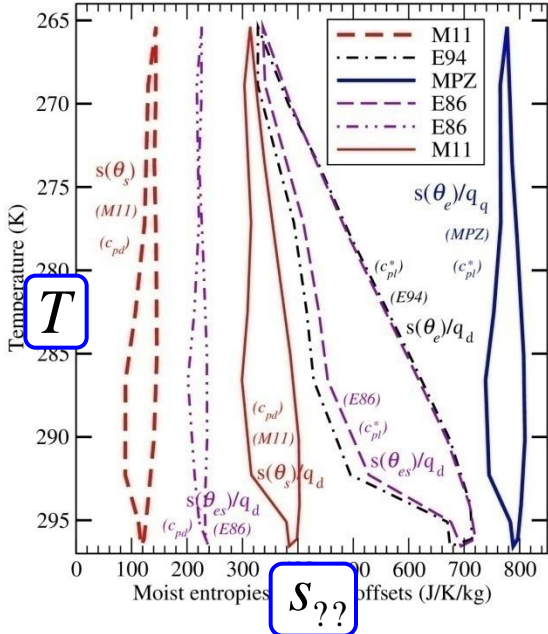
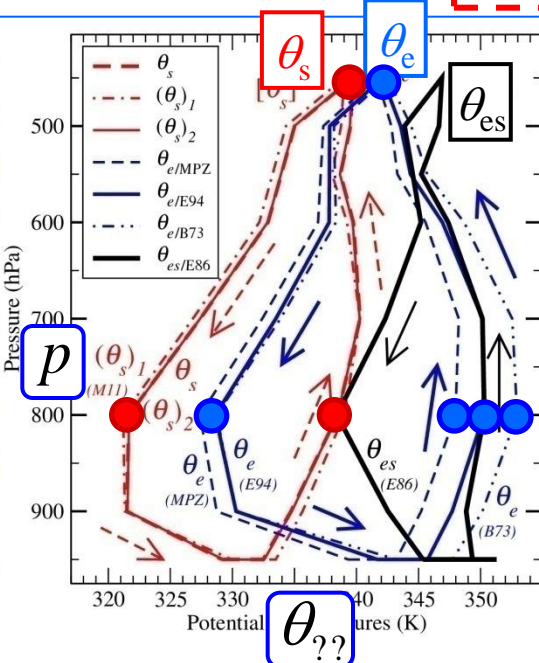
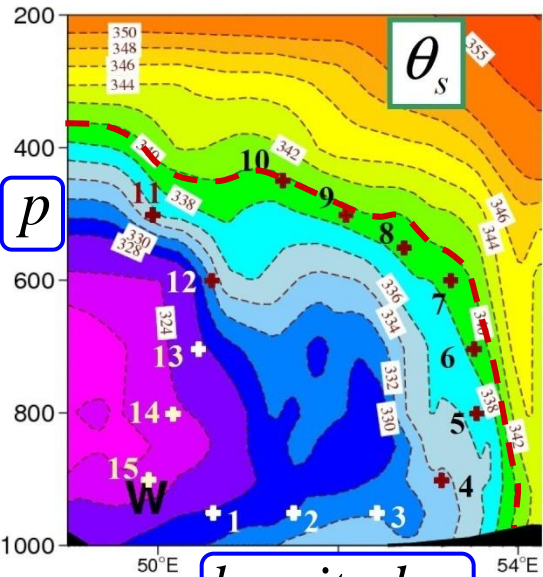
$$\theta_s \approx \theta_l \exp(6 q_t)$$



# L'entropie humide : DUMILE (2016)

◆ Impacts du 3<sup>ème</sup> principe de la thermo : avec  $\Lambda_r \approx 6!$

$$\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda_r q_t)$$



◆ Cycle de Carnot :

$$W = \oint T(s) ds$$

"θ"	$\theta_{es}/E86$	$\theta_s$	$\theta_e/MPZ$	$\theta_s$	$\theta_{es}/E86$	$\theta_e/E94$
"s"	$s/q_d$	$s$	$s/q_d$	$s/q_d$	$s/q_d$	$s/q_d$
"c <sub>p</sub> "	$c_{pd}$	$c_{pd}$	$c_{pl}^*$	$c_{pd}$	$c_{pl}^*$	$c_{pl}^*$
<b>W</b>	452	892	1213	1572	2871	3564
$\sqrt{2W}$	30.1	42.2	49.2	56.1	75.8	84.4

◆ Entropies & W variables !

$$s (/ q_d ?) = s_{??} + c_{??} \ln(\theta_?)$$

◆ Gros impacts sur W !

# Entropie → Nombre de Lewis turbulent

Richardson (1919)

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

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

Nb de Lewis (1922) : rapport des coef. ech. Thermique/Humidité

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

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

Lamboley / Honnert (2016)

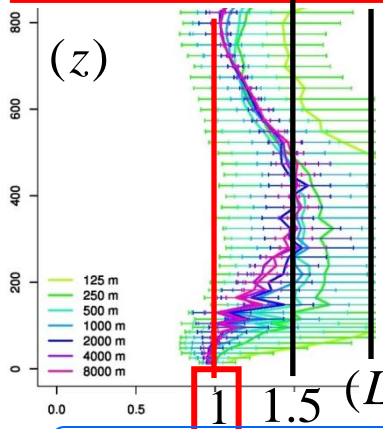
$$\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda_r q_t)$$

$Le_{ts}$  LES-IHOP-12h

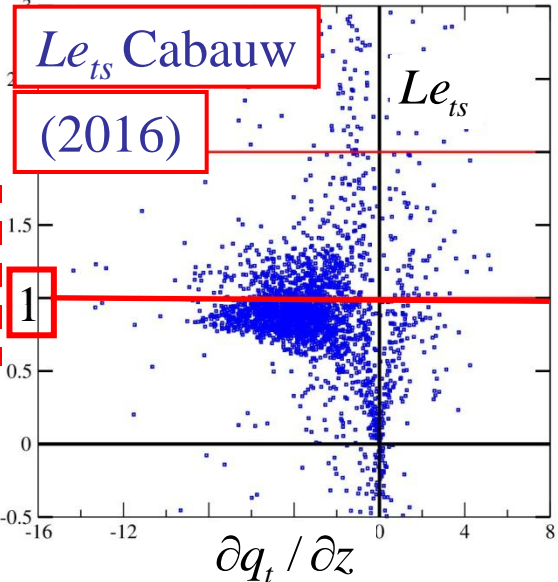
New "CBR" ?

$Le_{ts}$  Cabauw

(2016)



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



$$Y_s \propto \partial \theta_s / \partial z$$

$$Y_q \propto \partial q_t / \partial z$$

◆ si l'hypothèse " $Le_{ts} = 1$ " invalidée → revoir les schémas de turbulence ?

◆ Variations avec  $Y_s$  et  $Y_q$  / calibrations des 3 paramamètres :  $A$ ,  $A_\epsilon$  et  $B_\epsilon$

# Entropie → Nb de Lewis : Météopole-Flux

Nb de Lewis (1922) : rapport des coef. ech. Thermique/Humidité

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

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

$$Le_{ts} = K_s / K_w$$

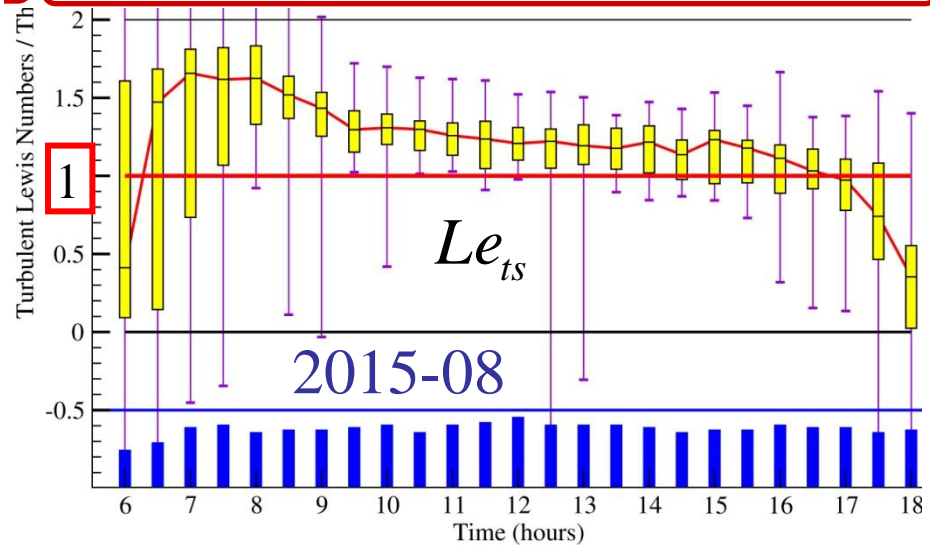
$$\overline{w'\theta'_l} = -K_w \left[ (Le_{ts}) \frac{\partial \bar{\theta}_l}{\partial z} + (Le_{ts} - 1) \Lambda_r \bar{\theta}_l \frac{\partial \bar{q}_t}{\partial z} \right]$$

$$\theta_s \approx \theta_l \exp(\Lambda_r q_t)$$

DEPHY2

Météopole-Flux (W. Maurel, CNRM/GMEI)

- ◆ Mesures des flux et variables :
- ◆  $\overline{w'q'_t}$ ;  $\overline{w'\theta'_s}$ ;  $\partial \bar{q}_t / \partial z$ ;  $\partial \bar{\theta}_s / \partial z$ ; ...
- ◆ de fin 2014 → avril 2016



- ◆ Hypothèse “ $Le_{ts} = 1$ ” invalidée ! → revoir les schémas de turbulence !
- ◆ un cycle diurne ! toujours présent mais variable d’un mois à l’autre, ...

# Entropie → Fréquence de Brunt-Väisälä

On a généralisé la définition de la fréquence de Brunt-Väisälä associée à la température potentielle humide.

Pascal MARQUET,  
Jean-François GELEYN QJRMS (2013)

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

utilisation de  $\theta_s$  :

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

formulations séparées pour les cas “non-saturé” et “saturés” :

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

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

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

: une formulation plus synthétique fonction de “M(C)” et “F(C)”...

# Entropie → Tourbillon Potentiel

On the definition of a moist-air potential vorticity. Marquet (QJRMS 2014)

◆ Hoskins *et al.* (1985) : utiliser “s” ou  $\theta$  pour définir PV

$$s = s_{ref} + c_{pd} \log(\theta)$$



$$PV(\theta) = \frac{1}{\rho} \vec{\zeta}_a \cdot \vec{\nabla}(\theta)$$

◆ Généralisation au cas de l'air humide ? Ertel (1942) : utiliser l'entropie

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



$$PV_s \approx \frac{1}{\rho} \vec{\zeta}_a \cdot \vec{\nabla}(\theta_s)$$

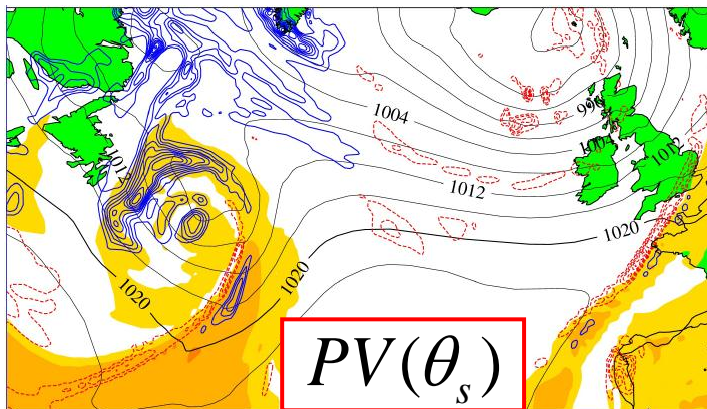
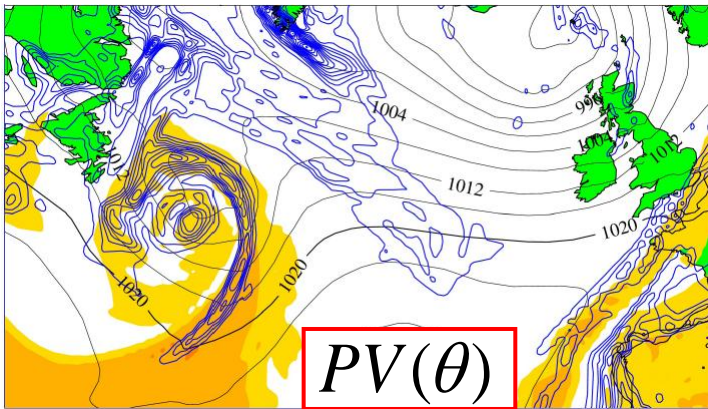
Bennetts & Hoskins (79) :

$$q_w = f \frac{g \rho}{\theta_0} PV(\theta'_w)$$

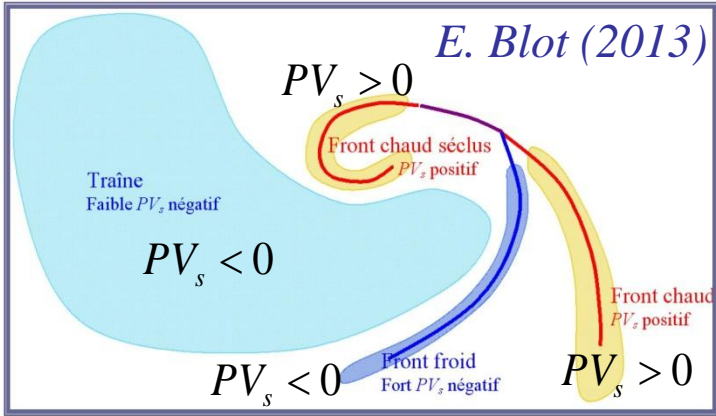
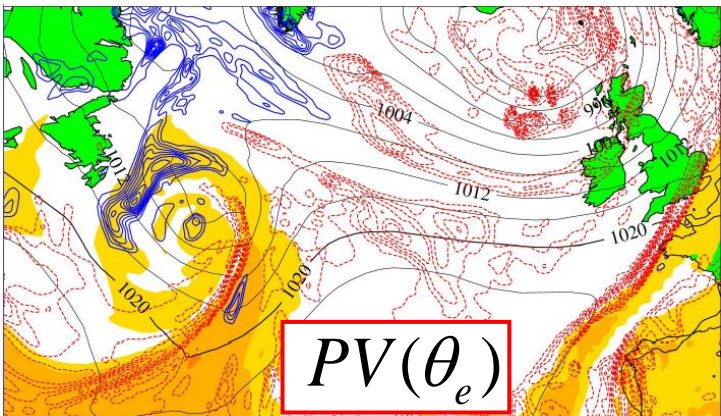
Emanuel (87) :

$$q_{ge} = \frac{g \rho}{f \theta_e} PV(\theta_{es})$$

# Entropie → Tourbillon Potentiel



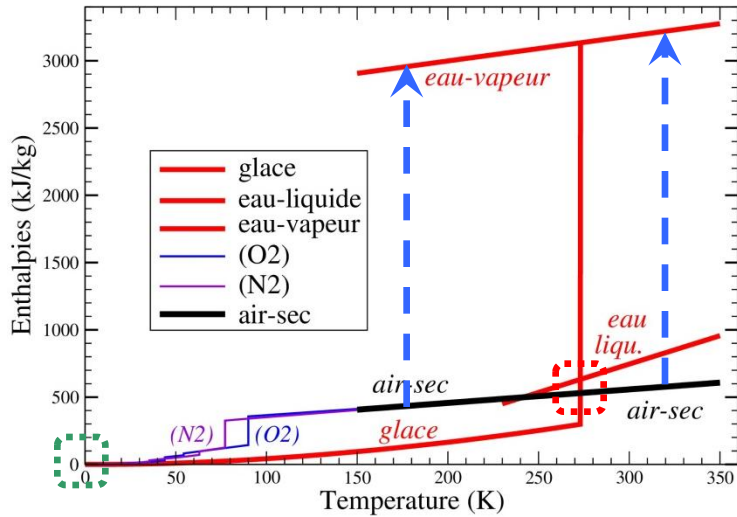
♦  $PV \uparrow$  partout positif (bleu) ;  $PV_e \downarrow$  négatif (rouge) ;  $PV_s \uparrow$  intermédiaire !



$\theta'_w$  : plages colorées  
 $PV$  : isolignes

21 sep. 2011 (r00/p12h) / moyenne  $PV(950, 925, 900)$  hPa

# Enthalpie → Flux de Chaleur Latente ?



Marquet (QJ RMS, 2015) (WGNE, 2015)

Richardson (22) Montgomery (48) Businger (82)

$$h = q_d h_d + q_v h_v$$

$$h = h_{ref} + c_{pd} T + L_h q_v$$

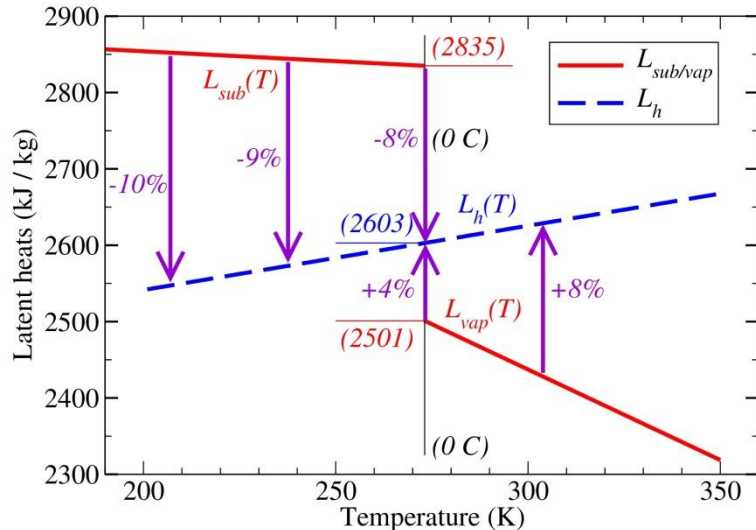
$$L_h(T) = h_v(T) - h_d(T)$$

Une “chaleur latente” = « différence d’enthalpie entre vapeur d’eau et air sec »

une solution = « un 3<sup>ème</sup> principe »

$$h_N = h_o = h_i = 0 \text{ à } T = 0 \text{ K}$$

$$\neq h_d = h_l = 0 \text{ à } 273.15 \text{ K}$$



## Enthalpie → Flux de Chaleur Latente ?

$$\diamond h = h_{ref} + c_{pd} T + L_h q_v \quad L_h(T) = h_v(T) - h_d(T)$$

$$\diamond F_h = \overline{w' h'}$$

$$F_h = c_p F_T + L_h F_v$$

$$F_T = \overline{w' T'}$$

$$F_v = \overline{w' q_v'}$$

le flux d'enthalpie      ≈ flux de "chaleur sensible"      ≈ flux de "chaleur latente"

◆ Comment utiliser ces résultats ? Doit-on utiliser ces résultats ?

◆ OUI : avec "h" pour tracer les "isenthalpes" ↔ isentropes

◆ OUI : avec "F<sub>h</sub>" pour calculer les "bilans d'énergie"

◆ NON : s'il faut calculer les "bilans de T ou de c<sub>p</sub> T"



# Plan

1

• Parcours Professionnel + Bilan recherche

2

• Exergie / Energie Utilisable (1988-2006 & 2015-2016)

3

• Paramétrisations physiques (1996 - 2008)

4

• Entropie & Enthalpie de l'air humide (2009 - 2016)

5

• Perspectives

## Perspectives 1/3

◆ La retraite dans 6 ans (avril 2022) → physique théorique...

### “Exergie / Enthalpie utilisable”

- ◆ “Norme Exergie” : Vect. Singuliers / FSOI / S.I. / Turb. cas stables ?  
(J.-F. Mahfouf)
- ◆ “diagrammes (h, s) de Mollier” → liens  $a_m$  avec la convection ?
- ◆ “Impact d’un 2xCO2” : est-ce encore intéressant ?
- ◆ “formulation Q.G.” : pour supplanter Lorenz définitivement ?
- ◆ “Entropie relative” / “Fonction de Kullback” → liens stat. ?

## Perspectives 2/3

### “Enthalpie et $L_h$ ”

- ◆ “sur-sat./sous-sat./mixte” : déjà fait ...
  - ◆ “Ar / CO2” : déjà fait ... IAPWS en septembre ?
- 
- ◆ “Flux d’enthalpie” : modifier les “bilans d’énergie” (LH : -9 à +6 %)
  - ◆ “Flux turbulents (juste) au dessus de la surface” : utiliser  $L_h / LH$  ?

## Perspectives 3/3

### “Entropie et $\theta_s$ ”

- ◆ “sur-sat./sous-sat./mixte” : déjà fait ...
- ◆ “Ar / CO2” : déjà fait ... IAPWS en septembre ?

- ◆ “Nombre de Lewis  $\neq 1$ ” : revoir la *turbulence* (Théorie + Instr. + LES)  
+ *flux océaniques* ECUME (W. Maurel + R. Honnert)
- ◆ “C.T.E.I. criterion” : stabilité des stratocumulus marins tropicaux...
- ◆ “Tourbillon potentiel” : études phénoménologiques / inversion / RECYF ?
- ◆ “Instabilité symétrique” :  $\theta_s$  mieux que  $\theta_e$  ou  $\theta_{es}$  ? Sting-Jet ? (D. Ricard)
- ◆ “MEP” / “bilan 3D” : idem ou améliorations % Pascale *et al.* (2011) ?
  - ◆ “Cyclones” : LACy / CRC ? (M.-D Leroux) / Climat ?



*MERCI!*



# Enthalpy → Latent Heat Flux ?

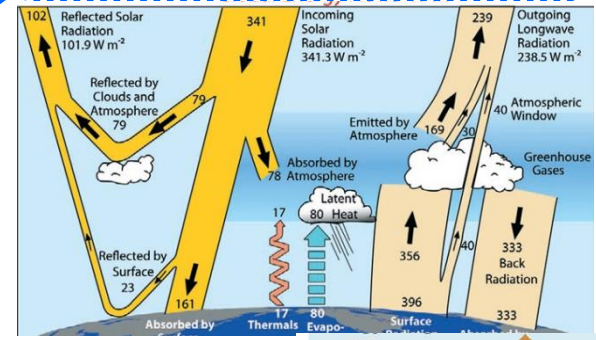
$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} - \frac{1}{\rho} \sum_k \left[ \vec{\nabla} \cdot (h_k \vec{J}_k) \right] + \dot{Q} \quad \left\{ \begin{array}{l} \leftarrow \text{bilan de l'énergie} \\ = \text{celui de l'enthalpie} \end{array} \right.$$

(atmosphère)

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} - \sum_k \left[ \frac{c_{pk}}{\rho} \vec{J}_k \cdot \vec{\nabla}(T) \right] + \sum_k \left[ h_k \frac{d_e q_k}{dt} \right] + \dot{Q}$$

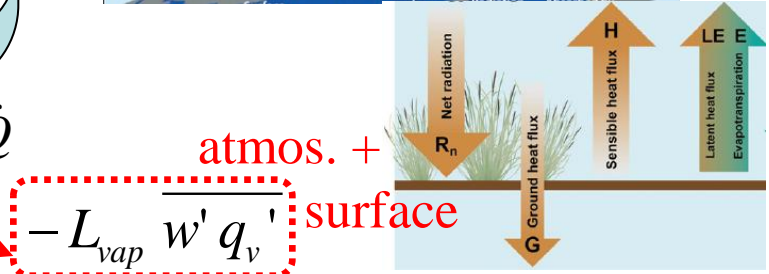
$h = \sum_k q_k h_k ; d = d_e + d_i$

$$L_h \overline{w' q_v'} = (h_v - h_d) \overline{w' q_v'}$$



$$\frac{dh}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} + \sum_k \left[ h_k \frac{d_e q_k}{dt} \right] + \sum_k \left[ h_k \frac{d_i q_k}{dt} \right]$$

$$c_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} - \sum_k \left[ \frac{c_{pk}}{\rho} \vec{J}_k \cdot \vec{\nabla}(T) \right] - \sum_k \left[ h_k \frac{d_i q_k}{dt} \right] + \dot{Q}$$



atmos. + surface

$$-L_{vap} \overline{w' q_v'} = -L_{vap} (\dot{q}_v)_{vap} - L_{sub} (\dot{q}_v)_{sub} - L_{fus} (\dot{q}_l)_{fus}$$

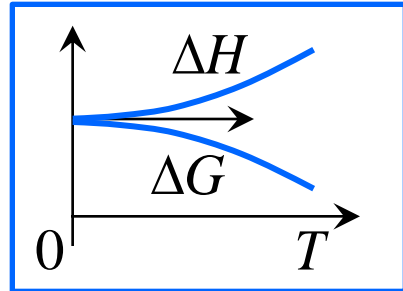
- ◆ Si on fait le bilan de l'énergie (enthalpie) : alors utiliser  $L_h$  !
- ◆ Couplages atmos. / surface ?

## « 3<sup>ème</sup> principe » ?

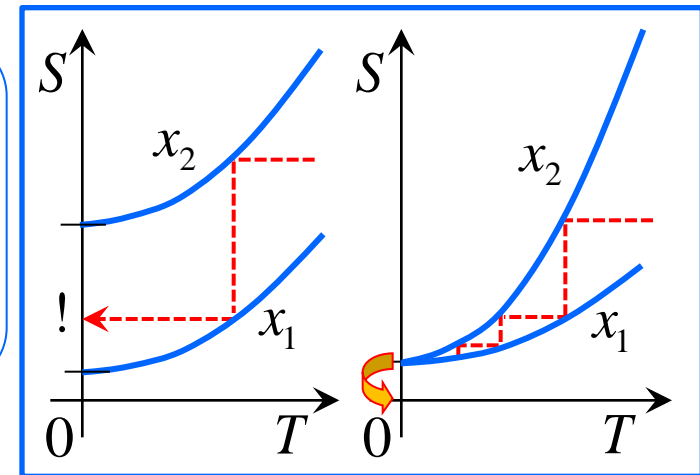
◆ Nernst (1906) « Heat theorem » : les variations d'entropie d'un système créés par des isothermes réversibles tendent vers 0 quand  $T$  tend vers 0

affinité chimique :  $\Delta G = \Delta H - T \Delta S \Rightarrow \Delta G \approx \Delta H$  quand  $T \rightarrow 0 \text{ K}$

◆ Planck (1911) : quand  $T \rightarrow 0 \text{ K}$ , l'entropie de toute substance dans sa phase cristalline (la plus stable) tend vers une constante universelle, que l'on peut poser égale à zéro.



◆ Nernst (1912) « principe d'inaccessibilité » : aucun processus thermodynamique ne peut permettre d'atteindre la température de 0 K en un nombre fini d'étapes et en un temps fini.



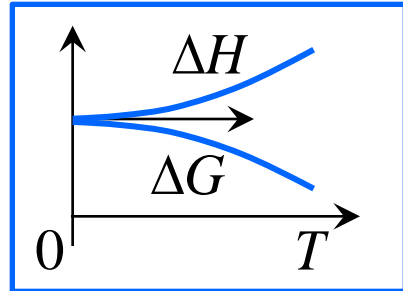


## « 3<sup>ème</sup> principe » ?

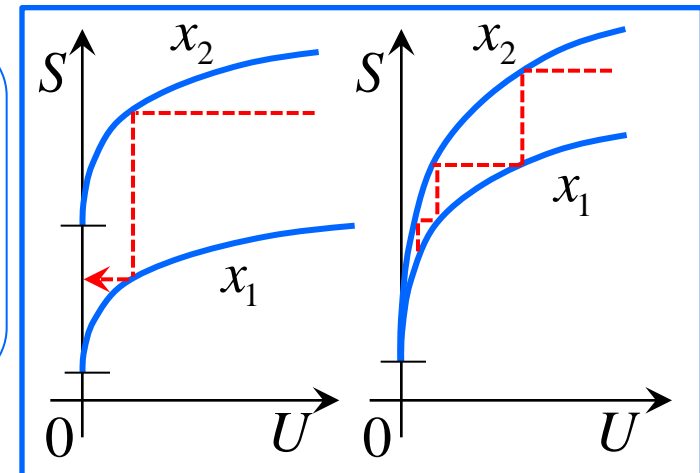
◆ Nernst (1906) « Heat theorem » : les variations d'entropie d'un système créées par des isothermes réversibles tendent vers 0 quand  $T$  tend vers 0

affinité chimique :  $\Delta G = \Delta H - T \Delta S \Rightarrow \Delta G \approx \Delta H$  quand  $T \rightarrow 0 \text{ K}$

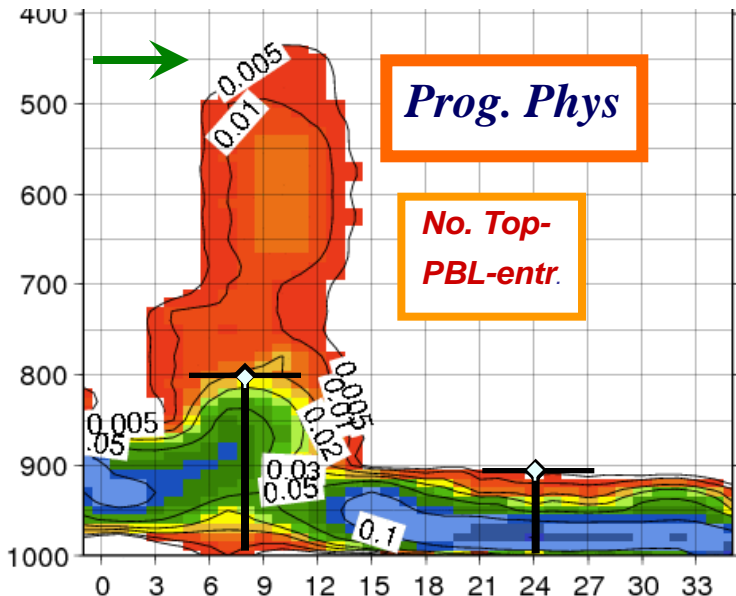
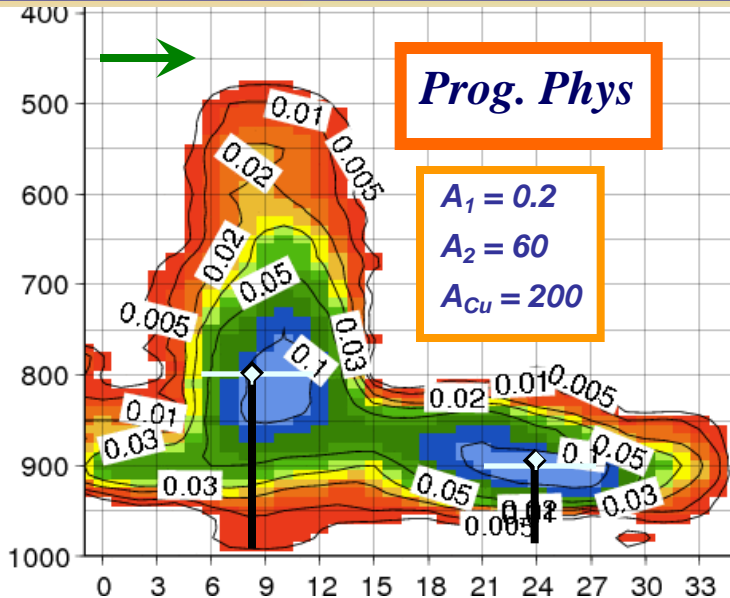
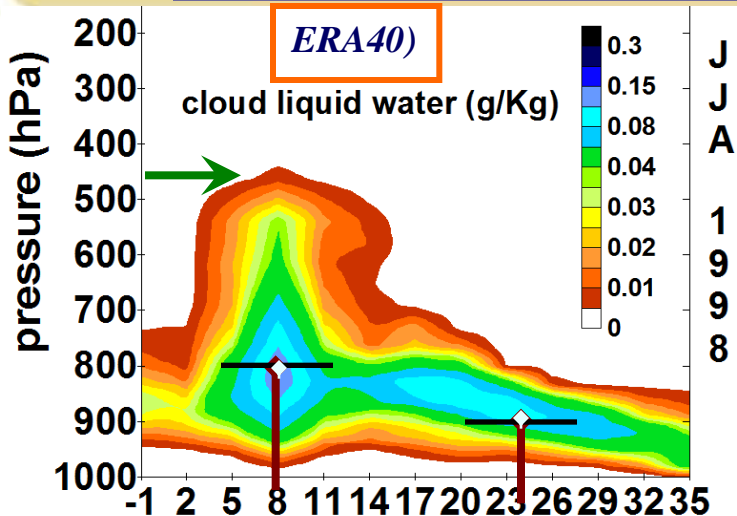
◆ Planck (1911) : quand  $T \rightarrow 0 \text{ K}$ , l'entropie de toute substance dans sa phase cristalline (la plus stable) tend vers une constante universelle, que l'on peut poser égale à zéro.



◆ Nernst (1912) « principe d'inaccessibilité » : aucun processus thermodynamique ne peut permettre d'atteindre la température de 0 K en un nombre fini d'étapes et en un temps fini.

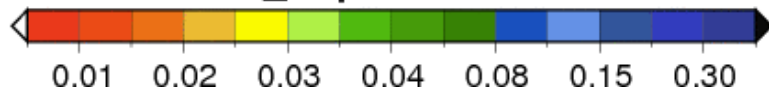


# Param. Phys. : DIAG → PROG2 + entraînement ?



◆ De vraies améliorations (J. Teixeira)  
sommet CVP + CVPP / ( $A_1 A_2 A_{cu}$ )

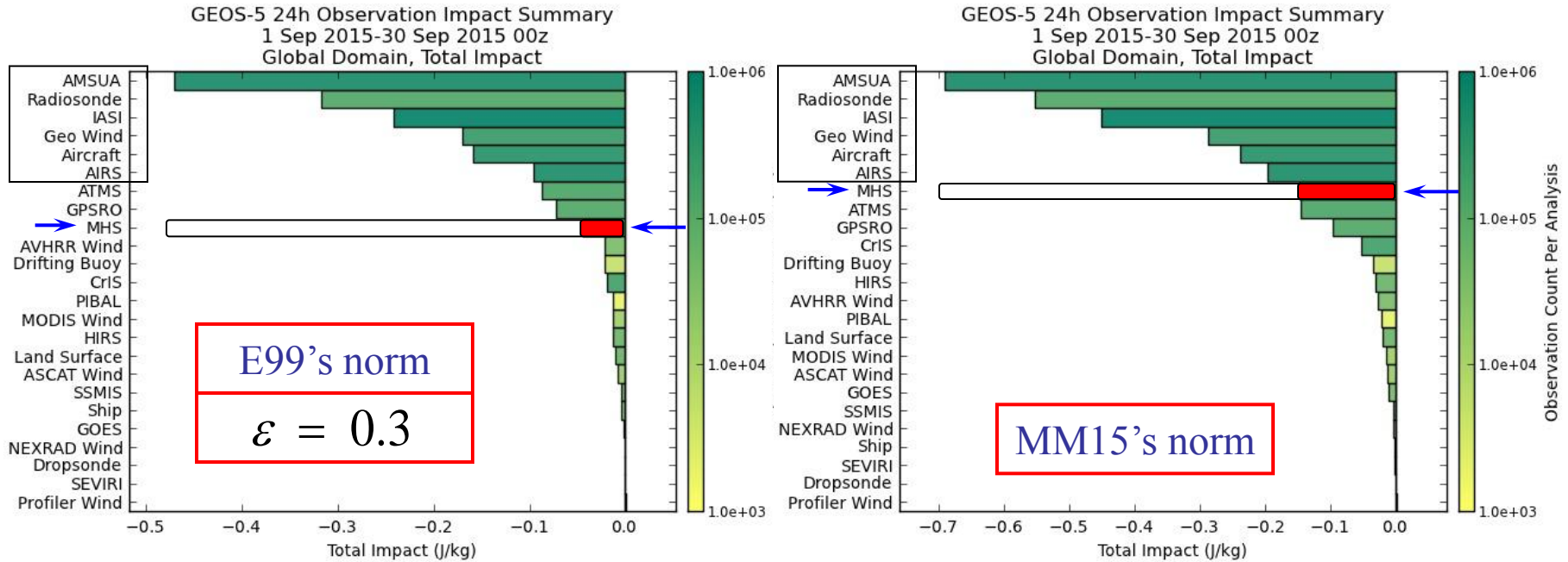
**Cloud Liquid Water**



Teixera et al. (J. Climate 2011)

# Impacts per analyses

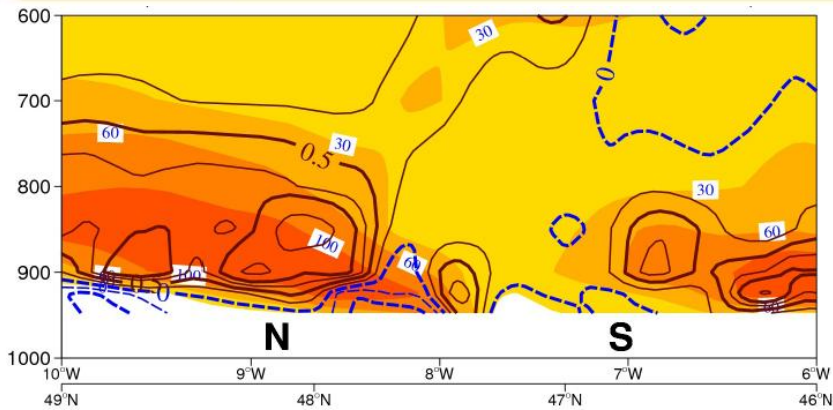
J.-F. Mahfouf : FSOI inter-comp. (2016) → tests Dan Holdaway (NASA)



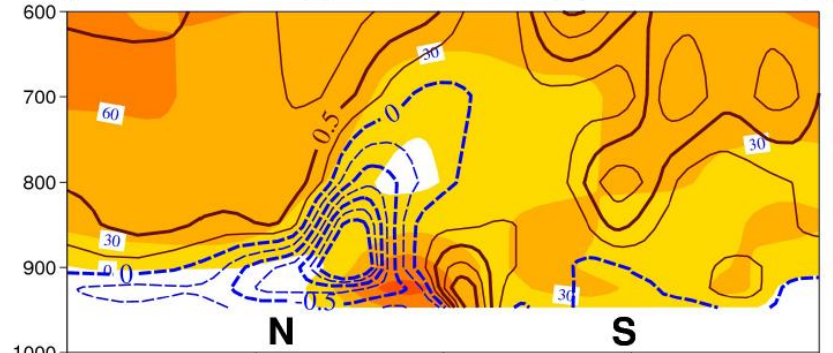
→ pas de changements du « Top-6 »  
 → mais : MHS ↗ : intéressant, car sensible à “r<sub>v</sub>”

→ MM15 : vecteurs singuliers humides / S.I. / TPE → MM15? / ... ??

# Tourbilon Potentiel Humide : S.I.

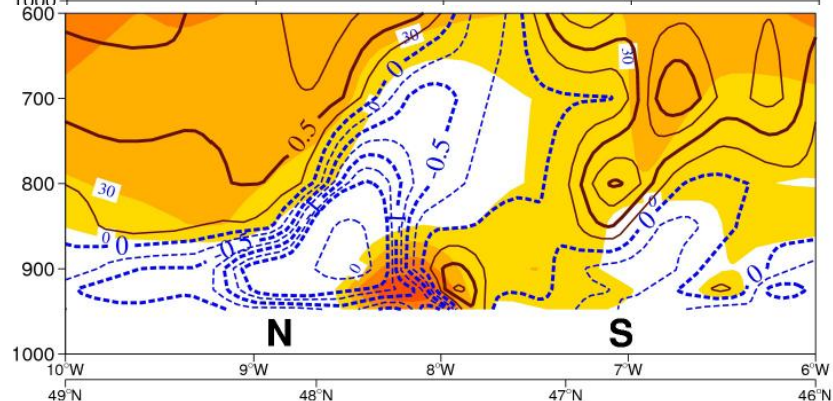


$PV_{es}$  and  $-\partial\theta_{es}/\partial p$



$PV_s$  and  $-\partial\theta_s/\partial p$

**Instabilité symétrique / Slantwise Convection :**  
 seul le couple ( $\theta_s$ ,  $PV_s$ ) semble vérifier les critères  
 (pointillés pour  $PV < 0$ , shading pour gradients positifs)



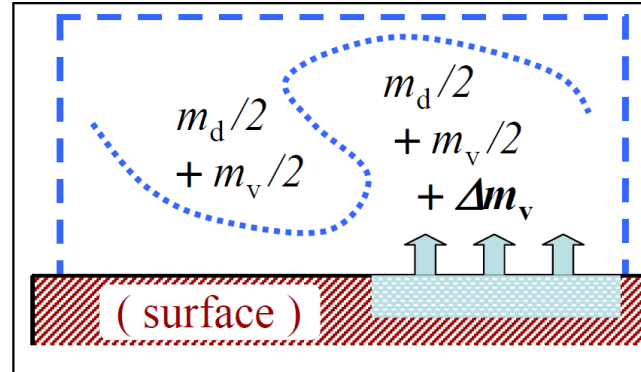
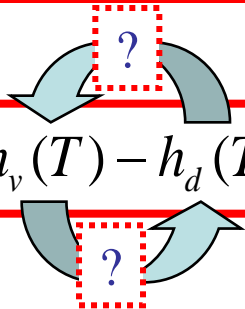
$PV_e$  and  $-\partial\theta_e/\partial p$



# Interprétation physique de « $L_h = h_v - h_d$ » ?

$$F_h = c_p F_T + L_h F_v$$

$$L_h(T) = h_v(T) - h_d(T)$$



$$dq_v = + \frac{m_d \Delta m_v}{m (m + \Delta m_v)}$$

$$dq_d = - \frac{m_d \Delta m_v}{m (m + \Delta m_v)}$$

$$dq_d = - dq_v$$

donc :  $dq_v = - dq_d$  et  $L_h = h_v - h_d$  analogue à une “chaleur Latente” (c’est à dire une “différence d’enthalpie”) entre l’air sec et la vapeur d’eau ?



pas de vrais [ échanges / réaction chimique / changement de phase ] entre air sec et vapeur d’eau : des échanges fictifs dus à la masse variable !

En fait, c’est comme la “force de poussée” pour une fusée ... / ...

# Calculs de l'enthalpie spécifique humide "h"

Enthalpie spécifique = une somme pondérée

**Loi de Dalton**  $h = q_d h_d + q_v h_v$

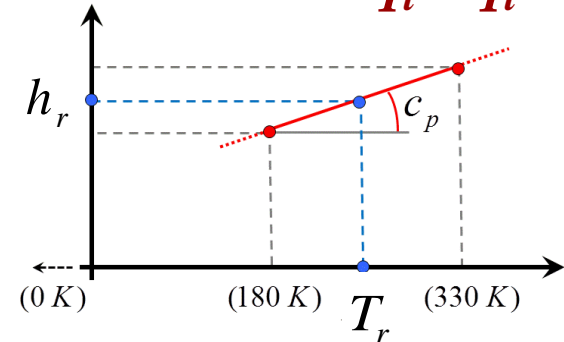
$$q_d \rightarrow h_d = c_{pd} (T - T_r) + (h_d)_r$$

$$q_v \rightarrow h_v = c_{pv} (T - T_r) + (h_v)_r$$

$$h = c_p (T - T_r) + [q_d (h_d)_r + q_v (h_v)_r]$$

et pour faire simple :

en "air clair" /  $q_l = q_i = 0$



**Richardson (22) Montgomery (48) Businger (82)**

problème pour calculer "h" : car  $(h_d)_r$  et  $(h_v)_r$

sont multipliés par les termes **variables**  $q_d$  et  $q_v$

→ connaître ces valeurs de référence  $(h_d)_r$   $(h_v)_r$  !

une solution = « un 3<sup>ème</sup> principe »

$$h_d = h_v = 0 \quad \text{à} \quad T = 0 \text{ K}$$

(Marquet / QJRMS 2015)



# Motivations

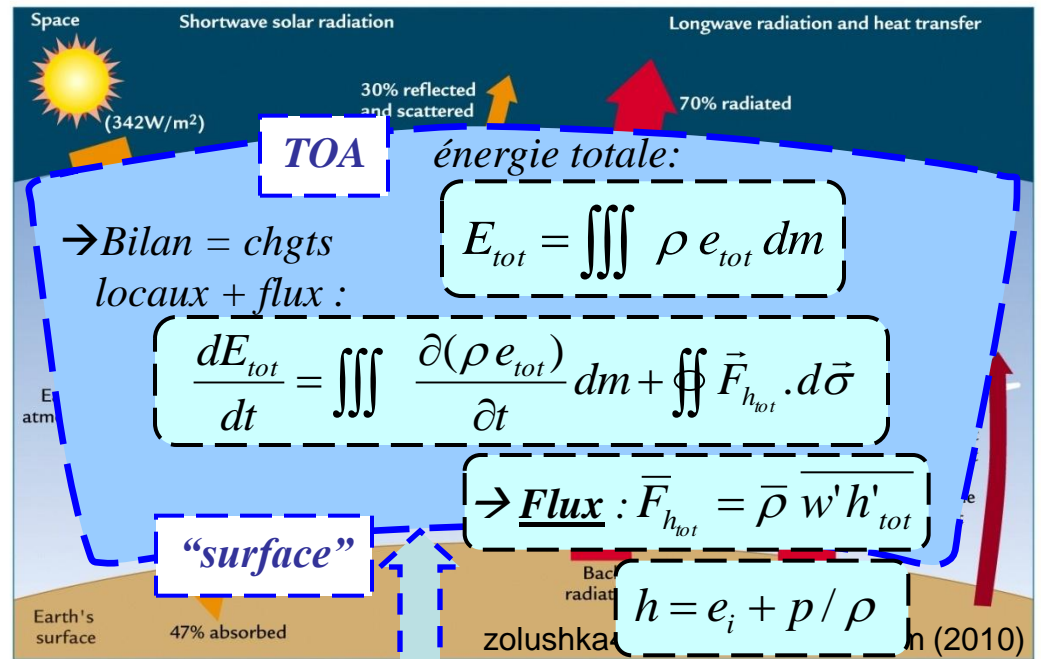
Question : comment calculer le bilan de l'énergie "près de la surface" ?

2) « énergie totale »  $e_{tot}$  :

interne + gravité + cinétique

⚠ pas d'énergie « latente »...

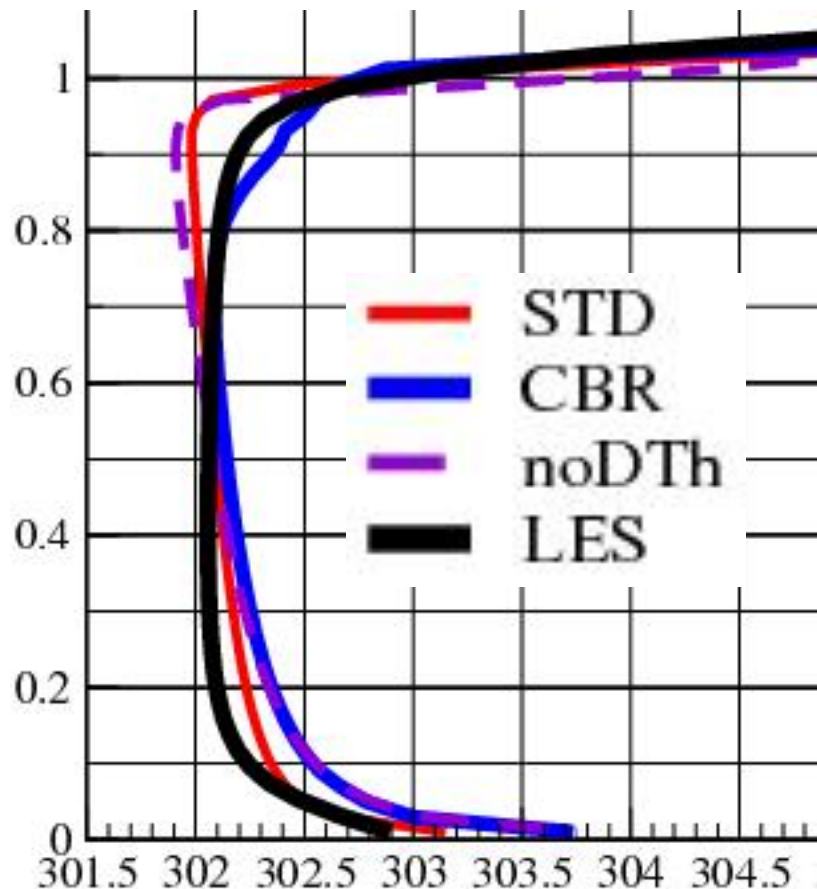
> Besoin de calculer l'enthalpie thermique totale  $h_{tot}$  et son flux, ceci à une vraie constante près...



un problème ancien : Montgomery (JM-1948), Businger (JAS-1982)...

→ une solution = Marquet (QJ-2015) : calculs de “ $h$ ”, puis de “ $h_{tot}$ ”

## Paramétrisations physiques



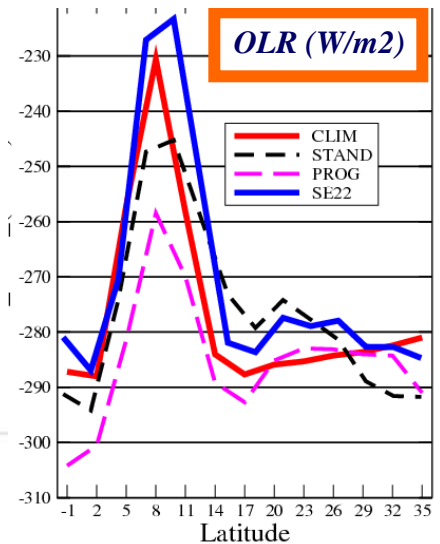
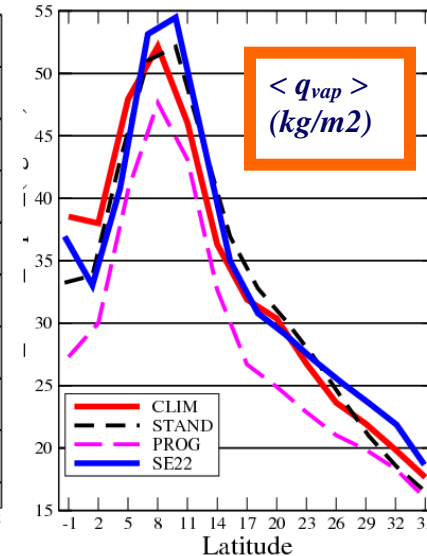
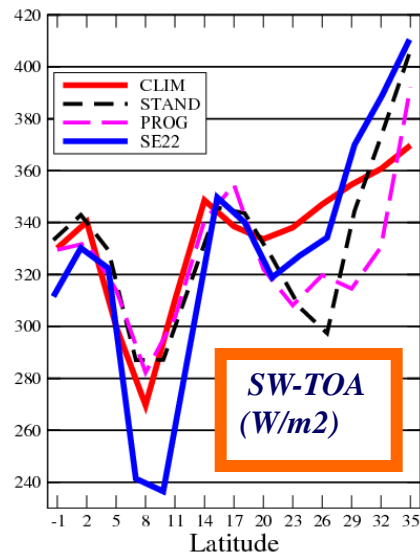
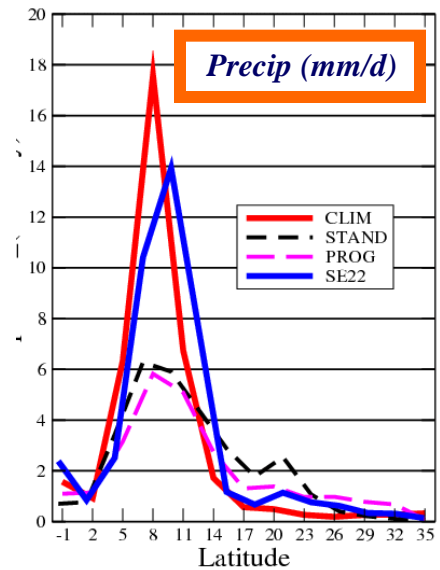
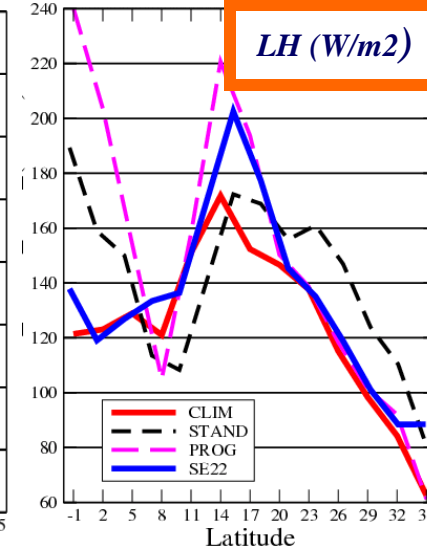
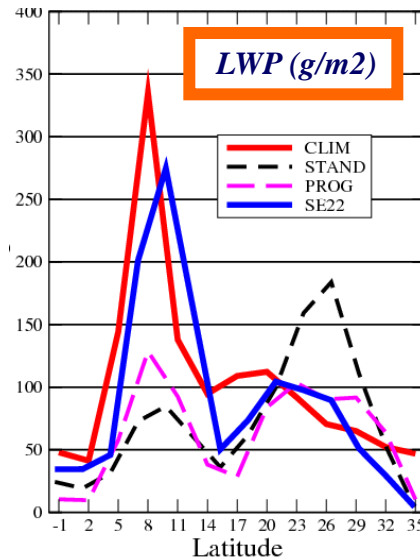
- ◆ Rapprochements CNRM/LMD  
→ les cas 1D Ayottes (1996)  
← impacts thermiques de Gueremy



# Paramétrisations physiques

## ARPEGE-GCM : *the GPCI (JJA-1998) results ?*

**CLIM = GPCI (Web Site)**  
**STAND = ARPEGE Standard Physics**  
**PROG = 2007 ARPEGE Prog Physics**  
**SE22 = 2008 ARPEGE Prog Physics**  
 Sc=(0.2 ; 60) and Cu=(200)



## ***Parcours scolaire et professionnel / 1980 (36 ans)***

### Météorologie (oper.) :

- 1983-86 : prévisionniste
- 1990-91: Prévi-NUM
- 1991-95 : COMPAS
- 1995-08 : GMGEC 60%
- 2008-14 : LABO 50%
- 2014-22 : GMAP 50%

(20 ans)

### Météorologie (chercheur) :

- 1982/83 : ITM3 (turbulence)
- 1988 : IM2 (LMD-X)
- 1988-90 : FCPLR (LMD-X)
- 1995-08 : GMGEC 40%
- 2008-14 : Prévi/LABO 50%
- 2014-22 : CNRM/GMAP 50%

(13 ans)

### Universitaire :

- 1982 : Licence-A (Paris-7)
- 1985 : Licence-B (Rennes-I)
- 1986 : Maîtrise (Rennes-I)
- 1988 : DEA (Paris-6)
- 1994 : Thèse Doctorat UPS
- 1995 : Prix Prud'Homme SMF
- 2016 : HDR