

Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère  
Journées DEPHY2  
Toulouse, le 21 janvier 2016

**Définition du "flux latent"  
à la base de l'atmosphère.**

*Pascal MARQUET  
Météo-France. CNRM-GMAP-Proc*



# Plan

1

## • Motivations

- AMA-2015 → WGNE « Blue Book » 2015 : <http://arxiv.org/abs/1503.01649>  
[http://www.wcrp-climate.org/WGNE/BlueBook/2015/chapters/BB\\_15\\_S4.pdf](http://www.wcrp-climate.org/WGNE/BlueBook/2015/chapters/BB_15_S4.pdf)
- Conférence CNES à Paris en novembre 2015 : annulée...

2

## • Calcul des flux de l'enthalpie

- une analogie avec la poussée des fusées (masse variable)...

3

## • Tests avec les versions SCM et NWP de ARPEGE

- un nouveau cas 1D : ARM-Cu avec surface rendue interactive

4

## • Conclusions - Perspectives

# Plan

1

- Motivations

2

- Calcul des flux de l'enthalpie

3

- Tests avec les versions SCM et NWP de ARPEGE

4

- Conclusions - Perspectives

# Motivations

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

3)

2)

1)

1) "près de la surface" :

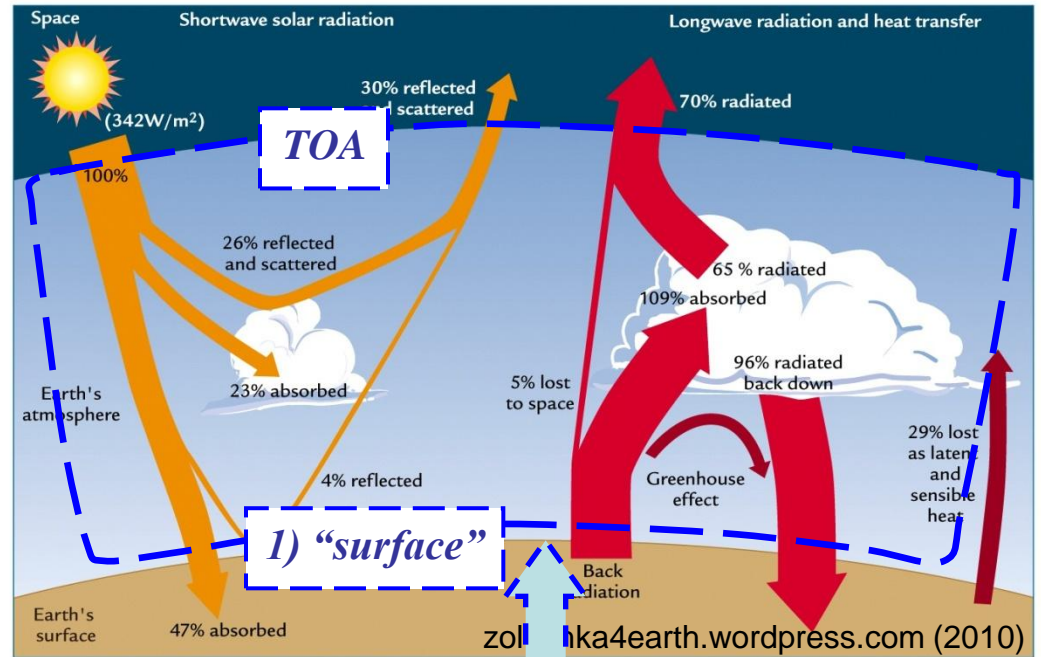
- un peu au-dessus de la surface
- là où les flux turbulents existent

flux turbulents  
de l'énergie :

$$\overline{\rho w' e'} = ?$$

$$dT_{surf} / dt = ?$$

(le bilan de l'énergie en surface)



# Motivations

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

3)

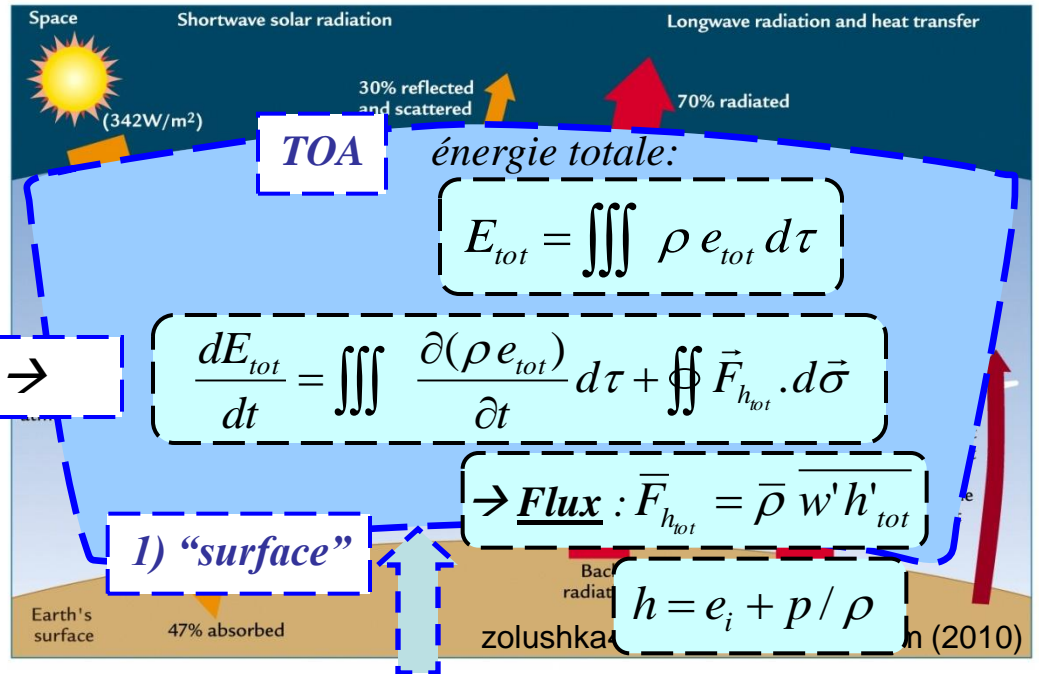
2)

1)

2) « énergie totale »  $e_{tot}$  :

interne + gravité + cinétique

⚠ pas d'énergie « latente »...



3) Bilan = évol. locales + Flux →

# Motivations

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

3)

2)

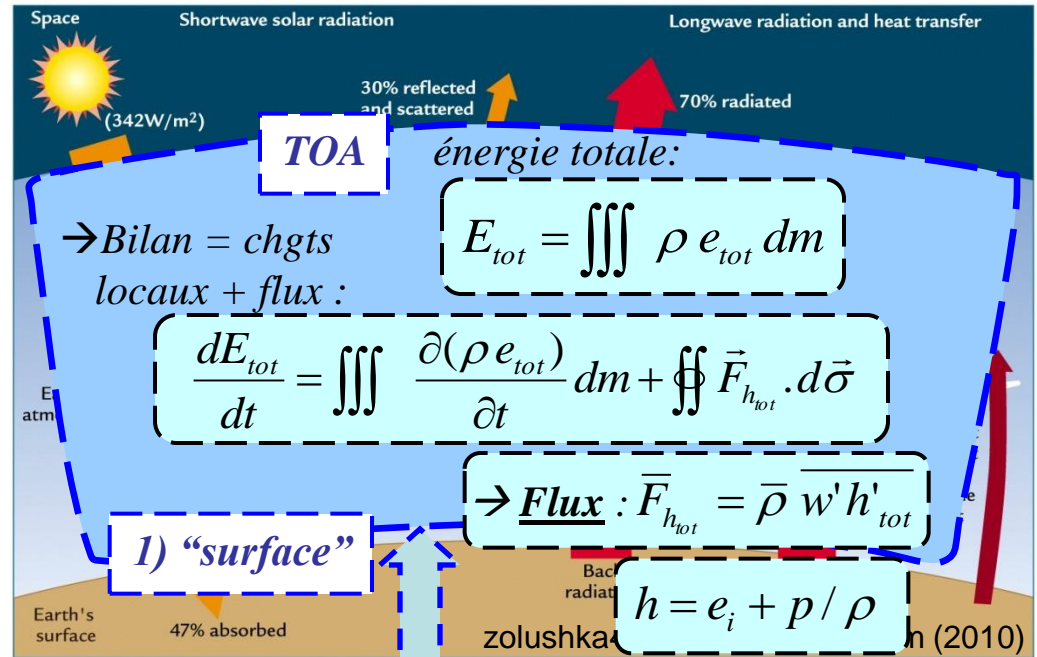
1)

2) « énergie totale »  $e_{tot}$  :

interne + gravité + cinétique

⚠ pas d'énergie « latente »...

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



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

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

# Plan

1

- Motivations

2

- Calcul des flux de l'enthalpie

3

- Tests avec les versions SCM et NWP de ARPEGE

4

- Conclusions - Perspectives

# Calculs de l'enthalpie spécifique humide "h"

Enthalpie spécifique = une somme pondérée :

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

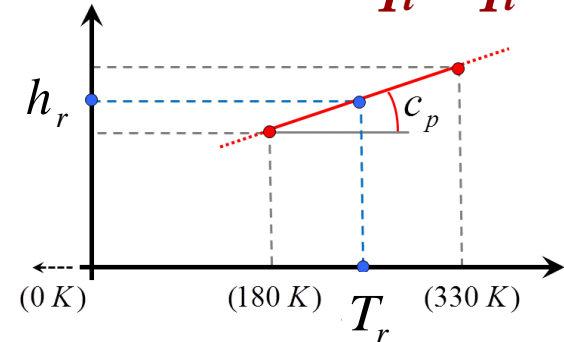
$$q_d \longrightarrow h_d = c_{pd} (T - T_r) + (h_d)_r$$

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

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

**(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)





# Calculs de l'enthalpie spécifique humide "h"

Calculs faits, on obtient  
l'enthalpie spécifique :

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

$$h_{ref} = (h_d)_r - c_{pd} T_r$$

(une vraie constante)

presque les termes attendus :

$$MSE = c_p T + L_{vap} q_v + \phi$$

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

Une nouvelle « **chaleur latente** » :  
puisque une « **différence d'enthalpie**  
entre *l'air sec* et la *vapeur d'eau* »

Similaire à la chaleur latente de vaporisation →

$$L_{vap}(T) = h_v(T) - h_l(T)$$

ou à celle de sublimation →

$$L_{sub}(T) = h_v(T) - h_i(T)$$

# Calculs du flux d'enthalpie spécifique humide " $F_h$ "

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

$$F_h = \overline{(\rho w)' h'}$$

$$F_h = c_p F_T + L_h F_v$$

$$F_T = \overline{(\rho w)' T'}$$

$$F_v = \overline{(\rho w)' q_v'}$$

le flux d'enthalpie

≈ un flux de « chaleur sensible »

≈ un flux de "chaleur latente"

le défi est de devoir calculer :

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

avec :  $L_h(T) \neq L_{vap}(T)$

et :  $L_h(T) \neq L_{sub}(T)$

# diagramme des “chaleurs *latentes*” $L_{vap}$ , $L_{sub}$ et $L_h$

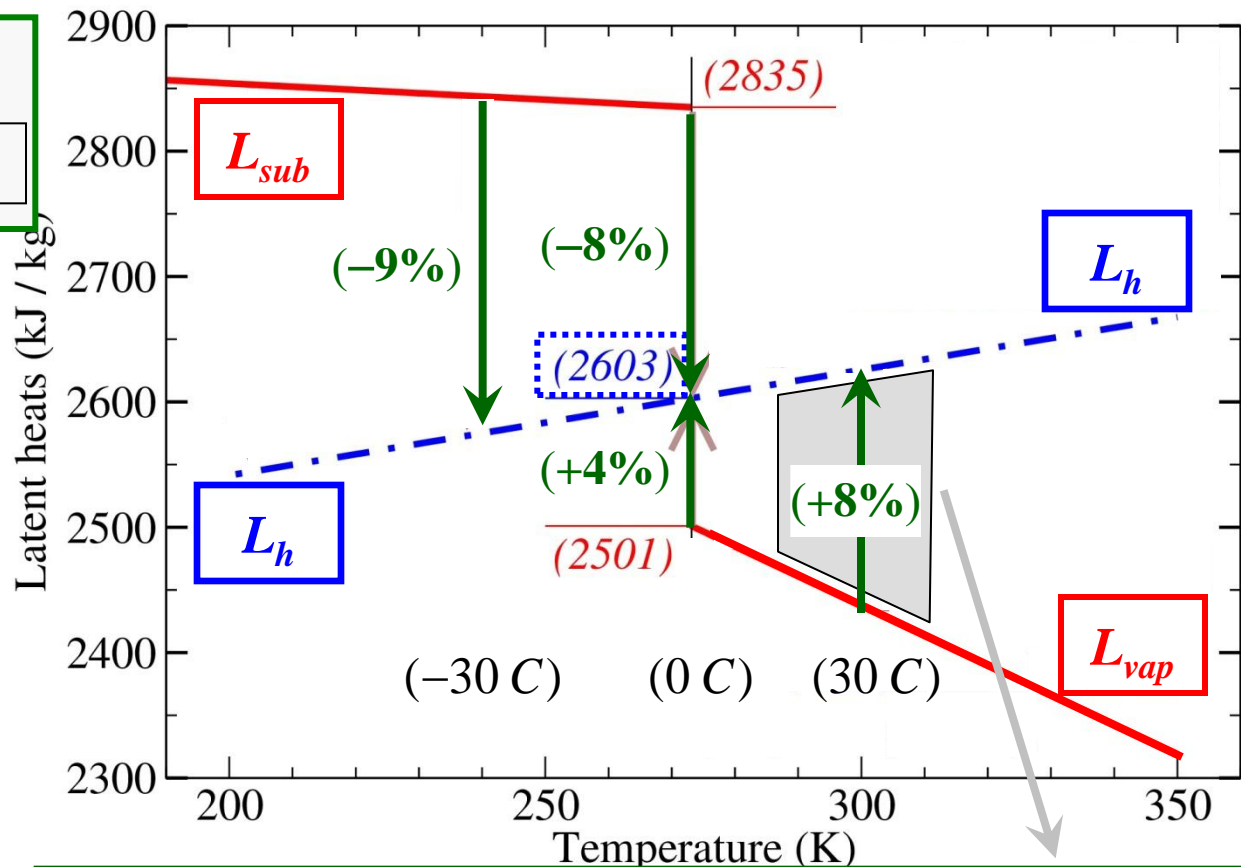
« un 3<sup>ème</sup> principe »

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

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

$$L_h(T_0) \approx 2603 \text{ kJ/kg}$$

$L_h(T)$  proche de,  
 mais intermédiaire,  
 $L_{vap}(T)$  et  $L_{sub}(T)$   
 + croissante avec T  
 + continue à 0 C !

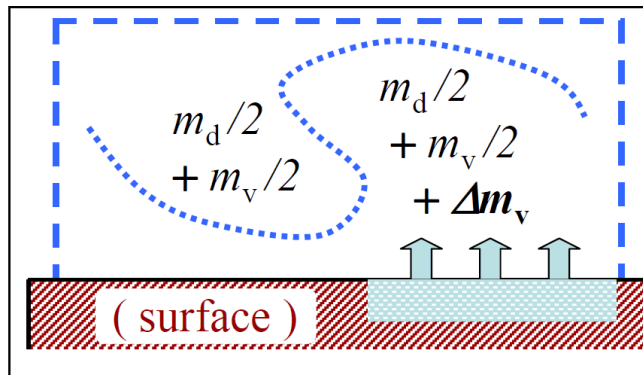


impacts de  $L_{vap}(T) \rightarrow L_h(T)$  dans les Tropiques  $\approx +8\%$

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

$$F_h = c_p F_T + L_h F_v$$

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



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

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

$$dq_d = - dq_v$$

pour  $dq_v = -dq_d$ ,  $L_h = h_v - h_d$  est 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 ... / ...*

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

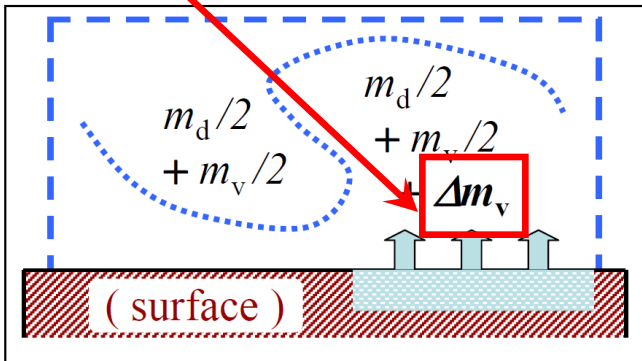
Isaac Newton (1687 / définition 8 / Loi II) : la variation (pendant  $\Delta t$ ) de la “quantité de mouvement” est proportionnelle à la force appliquée :  $\Delta(m\vec{v}) = \vec{F} \Delta t$

- Pour une fusée, on n’a pas :  $\frac{d}{dt}(m\vec{v}) = m \frac{d\vec{v}}{dt} + \left[ \frac{dm}{dt} \right] \vec{v} = \vec{F}$   
(même avec  $dm/dt \neq 0$ ):

- La méthode : conservation (entre “ $t$ ” and “ $t + \Delta t$ ”) de  $\sum_k \vec{p}_k = \sum_k m_k \vec{v}_k$  pour la “fusée + les masses éjectées”.

vraie loi

- Le résultat :  $m \frac{d\vec{v}}{dt} = \left[ \frac{dm}{dt} \right] \vec{v}_{eject.} = \vec{F}_{poussée}$

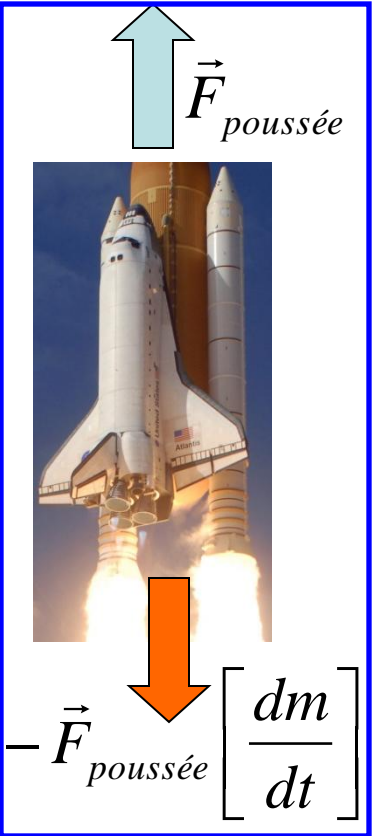


$$dq_v = + \frac{m_d \Delta m_v}{m (m + \Delta m_v)}$$

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


---


$$dq_d = - dq_v$$



# Plan

1

- Motivations

2

- Calcul des flux de l'enthalpie

3

- Tests avec les versions SCM et NWP de ARPEGE

4

- Conclusions - Perspectives

# Tests avec le modèle ARPEGE et la surface ISBA

Le but : remplacer **partout** les chaleurs “latentes” :  $L_{vap/sub} \rightarrow L_h$

$$c_p F_T + L_{vap/sub} F_v$$

$$F_h = c_p F_T + L_h F_v$$

impacts  $\approx (-9\% , +6\%) ?$

flux turbulents  
d'énergie :

$$\overline{\rho w' e'} = ?$$

$$dT_{surf} / dt = ?$$

Bilan d'énergie en surface

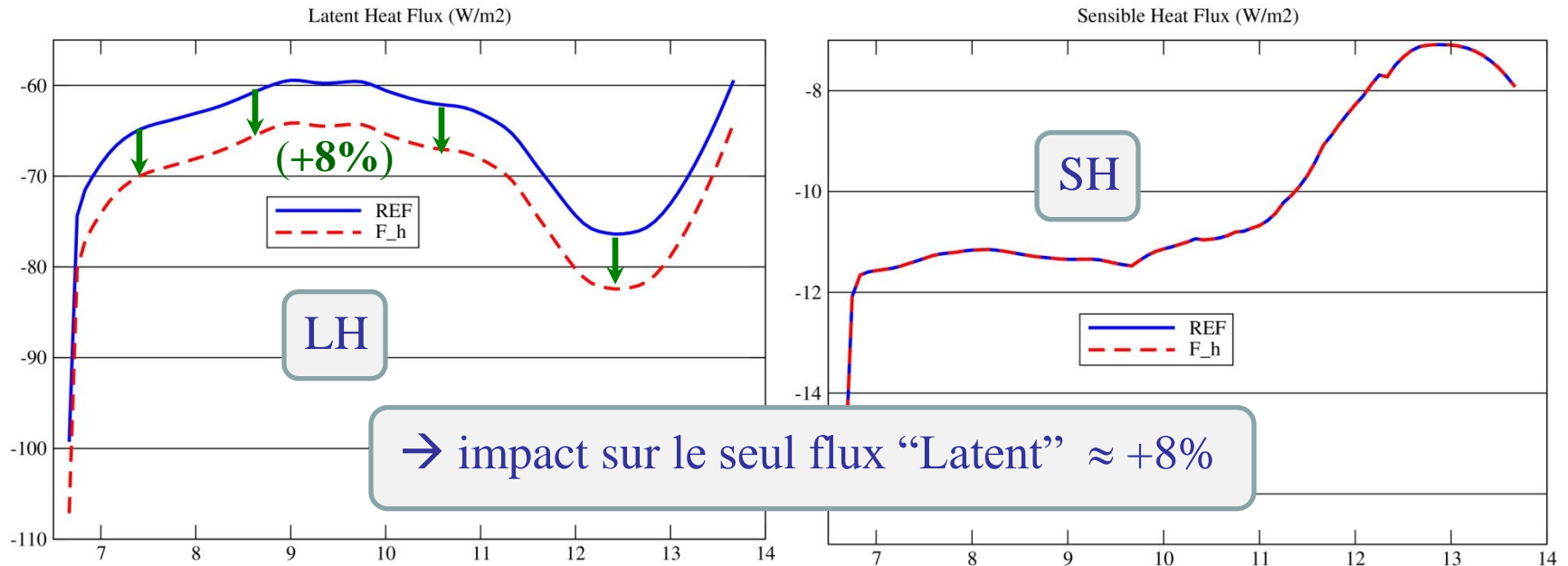
“**partout**” = y-compris les échanges avec la surface :  
énergie reçue en surface = celle perdue par l'atmosphère  
→ existence d'une couche  $\approx$  à “flux constant” ?

$$C \frac{dT_{surf}}{dt} = (1 - A) F_{SW} + F_{LW} + F_{h+\phi} - G$$

→ chgts coef. *matrice implicite diffusion...*

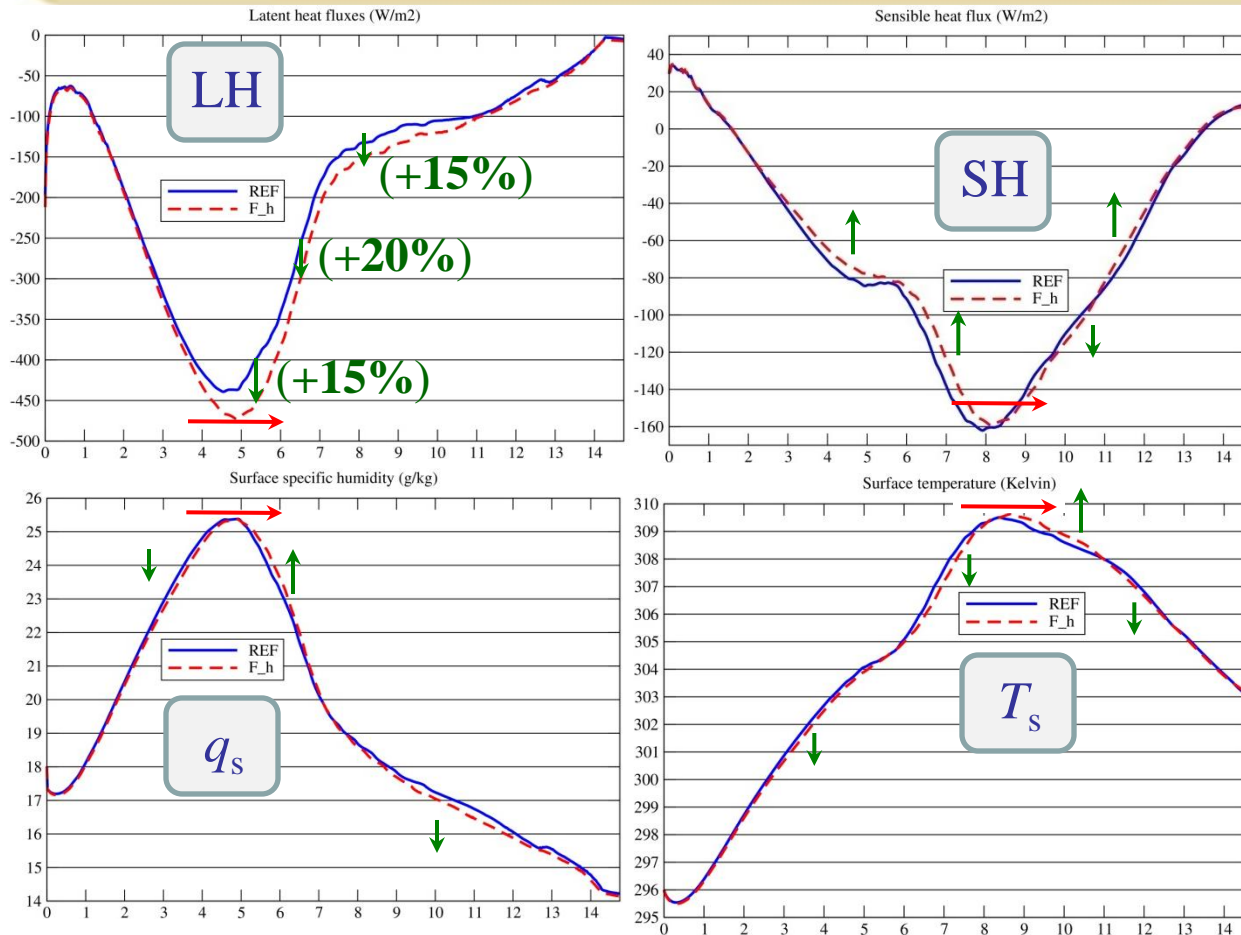
# « 1D » SCM / *TOGA-Coare* ( $T_s = 301.3\text{K}$ )

Convection profonde sur mer en forcé SST =  $T_s$  et  $q_{\text{sat}}(T_s)$





# « 1D » SCM / *ARM-Cumulus* ( $T_s$ de 295K à 310K)



Convection “peu prof.”  
sur terre + schéma surface  
non forcé → impacts sur  
LH / SH /  $q_s$  /  $T_s$

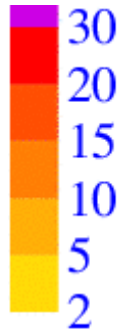
un petit décalage  
du cycle diurne : →  
changements de LH SH  
jusqu’à 15 à 20 % : ↓ ↑

**ARPEGE-PNT / ISBA**

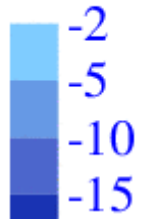
(arp\_ground\_param)

T1198 / c2.2 / L105

moyennes [J+1/J+2/J+3]



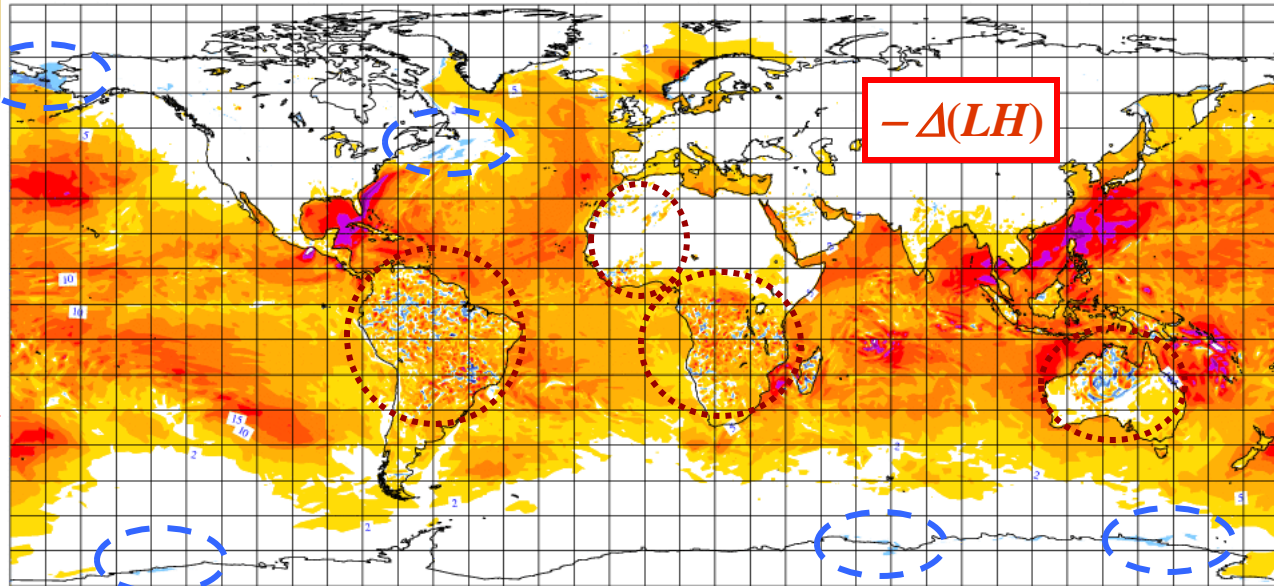
**$-\Delta(LH) :$   
 $+ 6.3 \text{ W/m}^2$**



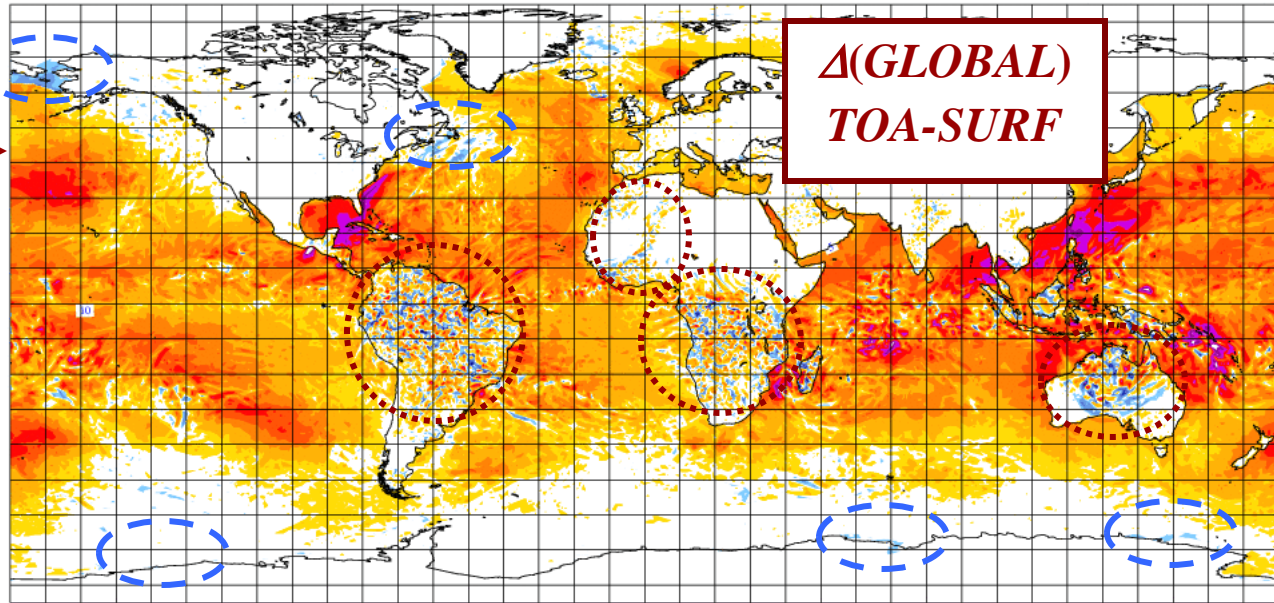
**$\Delta(GLOBAL)$   
 $TOA-SURF :$   
 $+ 5.8 \text{ W/m}^2$**

	TOA	SURF	GLOBAL
(ref)	+11.89	+10.8	+1.1
(test)	+11.86	+5.0	+6.9

Enthalpy fluxes / 20140115 / r0 / 24-96h / moins\_diff\_LH\_surf / diff: 7DI3-7DI2)



Enthalpy fluxes / 20140115 / r0 / 24-96h / diff\_GLOBAL\_Budget / diff: 7DI3-7DI2)



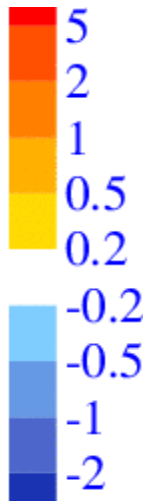
ARPEGE-PNT / ISBA

(arp\_ground\_param)

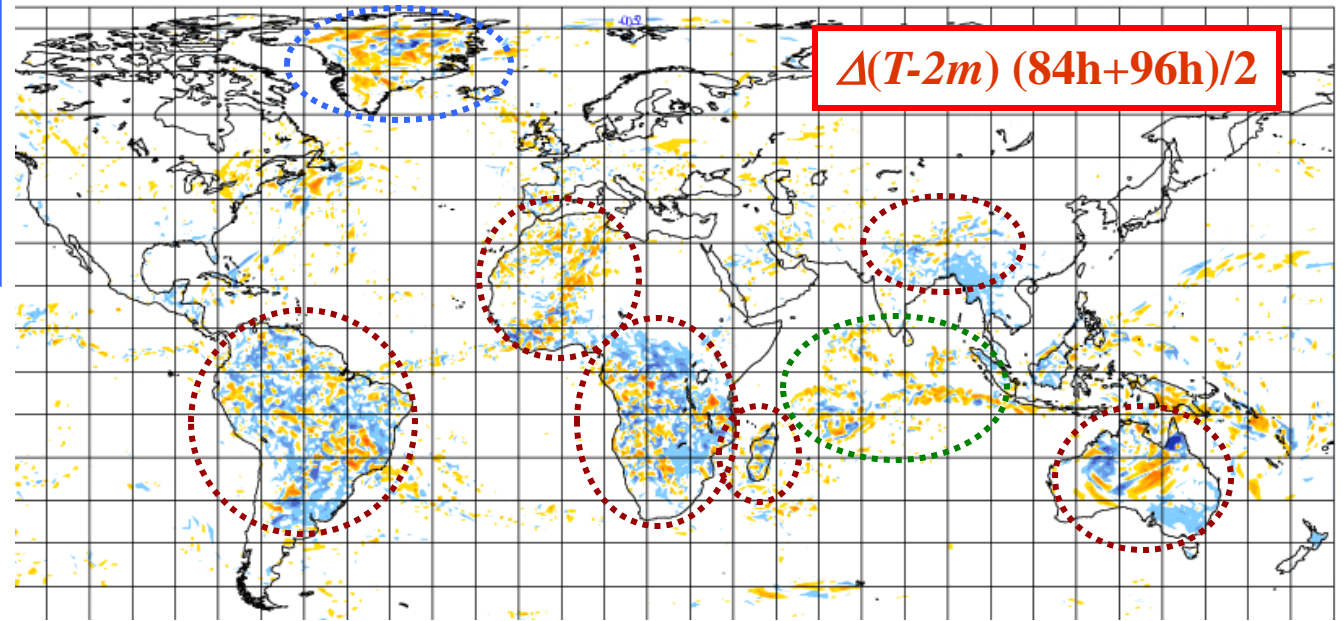
T1198 / c2.2 / L105

$\Delta(T-2m)$

(J+3) + (J+4)



enthalpy fluxes / 20140115 / r0 / 84-96h / diff\_T\_2m / diff: 7DI3-7DI2)



# Plan

1

- Motivations

2

- Calcul des flux de l'enthalpie

3

- Tests avec les versions SCM et NWP de ARPEGE



4

- Conclusions - Perspectives

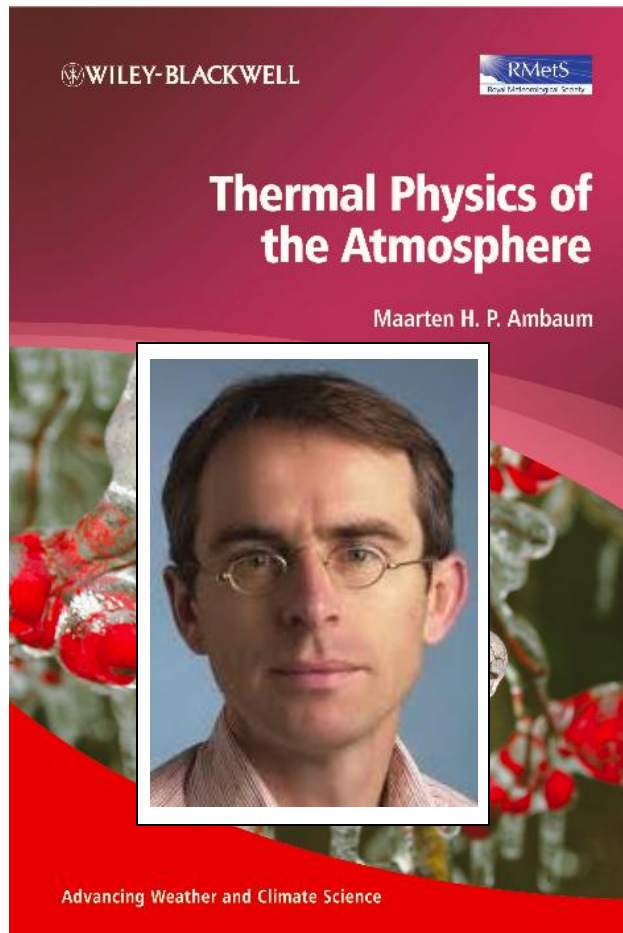
## Conclusions

- On peut calculer l'enthalpie (ther. spec.) de l'air-humide “ $h$ ” (“3<sup>ème</sup> principe”)
  - il faut remplacer “MSE” par “ $h + g z$ ” où “ $h$ ” est l'enthalpie
  - l'enthalpie vaut  $h = c_{pd} T + L_h q_v$  et son flux  $F_h = c_p F_T + L_h F_v$
  - où la “chaleur latente”  $L_h$  est proche mais différente à la fois de  $L_{vap}$  et  $L_{sub}$
  - seule la somme “ $c_p F_T + L_h F_v$ ” a un sens physique, et pas “ $c_p F_T$ ” et “ $L_h F_v$ ” séparément !
- Impacts  $6 \text{ à } 15 \text{ \% (W/m}^2\text{)}$  pour les bilans d'énergie en surface et en global
- Interprétation physique de  $L_h$  : échanges apparents entre “air sec” et “vapeur d'eau”

## Perspectives

- Facile de prendre en compte  $q_1 \neq 0$  et  $q_i \neq 0$  (nuages / brouillard / embruns)
- Tout cela semble logique... mais comment valider cette vision ?
  - sites de mesure : flux et bilans complets en surface,  mais à 6 à 15 % ?
  - via une réduction des biais des modèles ?
-  autres biais plus larges : rayonnement /  $C_m$   $C_h$   $C_h$  / longueur de mélange ...
  - liens avec la turbulence atmosphérique :  $\langle w'(h+\phi)' \rangle \leftrightarrow \langle w'(\theta_s)' \rangle$  ?

*Merci / Questions ?*



“The sensible and latent heat fluxes are **contained** in the total enthalpy flux of moist air”.

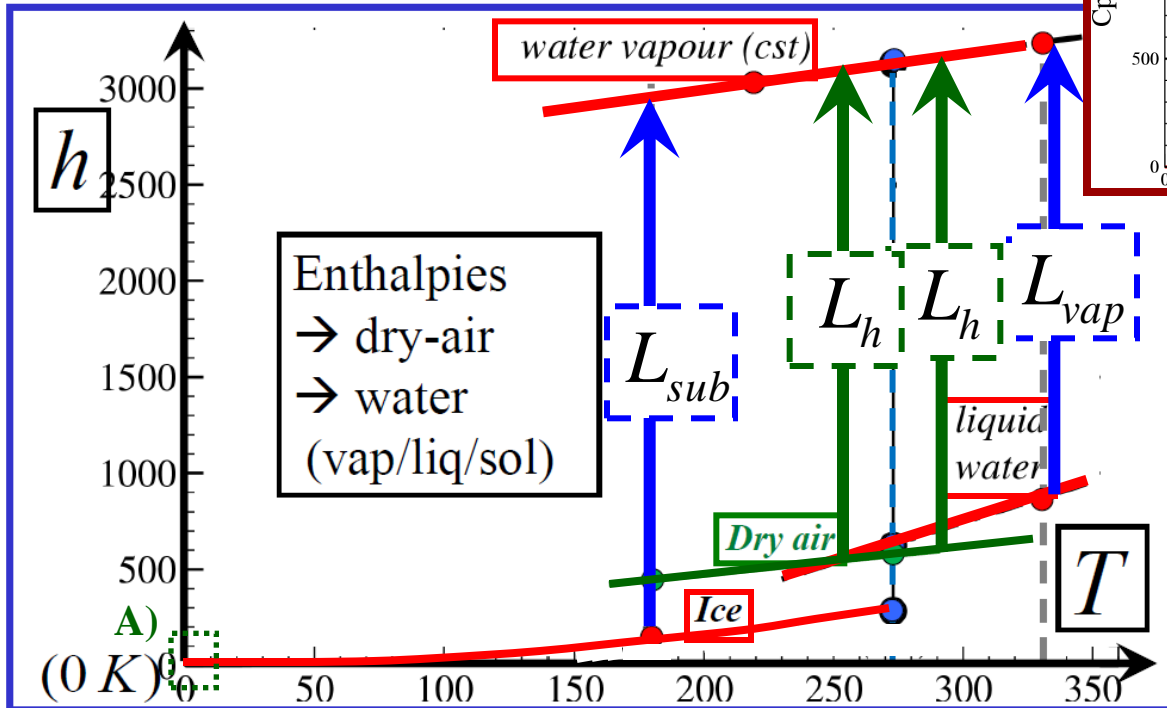
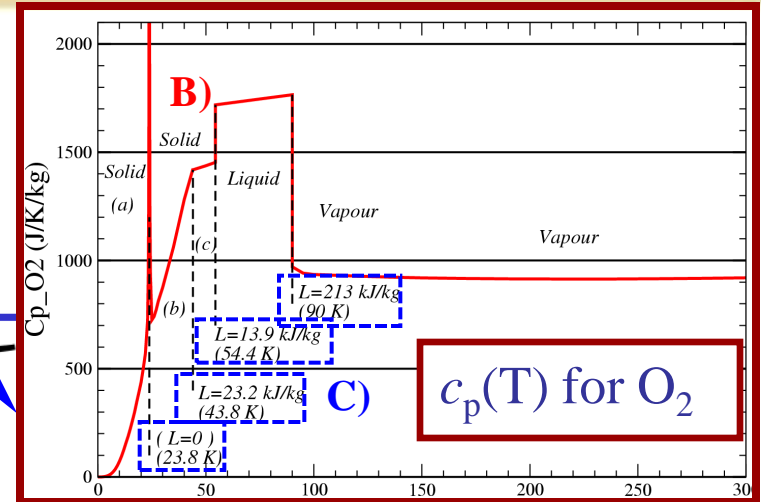
“The sensible heat flux and the latent heat fluxes are essentially the two main contribution to the total enthalpy flux in moist air”.

“To measure the total enthalpy flux we need to know both the sensible and the latent heat fluxes, **but** for evaluating energy budget it makes little sense to consider them **separately**”.



# Computations of $L_h = h_v - h_d$ via the reference enthalpies

$$h_{ref}(T_{ref}) = \underbrace{h(T=0)}_{\text{A)}} + \underbrace{\int_0^{T_{ref}} c_p(T) dT}_{\text{B)}} + \underbrace{\sum_k L_k}_{\text{C)}}$$



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

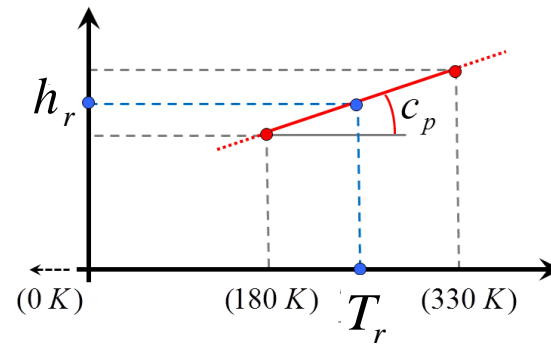
(Marquet : QJRMS 2015)

# Full computations of the moist-air enthalpy "h"

The specific enthalpy = a weighted sum :

$$h = q_d h_d + q_v h_v + q_l h_l + q_i h_i$$

$q_d$	→	$h_d = (h_d)_r + c_{pd} (T - T_r)$
$q_v$	→	$h_v = (h_v)_r + c_{pv} (T - T_r)$
$q_l$	→	$h_l = (h_l)_r + c_l (T - T_r)$
$q_i$	→	$h_i = (h_i)_r + c_i (T - T_r)$



# Full computations of the moist-air enthalpy flux

$$h = h_{ref} + c_{pd} T + L_h q_t - L_{vap} q_l - L_{sub} q_i$$

$$h = h_{ref} + c_{pd} T + L_h q_v + (L_h - L_{vap}) q_l - (L_{sub} - L_h) q_i$$

moist version

$\approx +2600$  kJ/kg

$$F_h = \overline{(\rho w)' h'}$$

$$F_h = c_p F_T + L_h F_v$$

$$\approx +150 \text{ kJ/kg} \rightarrow + (L_h - L_{vap}) F_l$$

$$\approx -250 \text{ kJ/kg} \rightarrow - (L_{sub} - L_h) F_i$$

$$F_T = \overline{(\rho w)' T'}$$

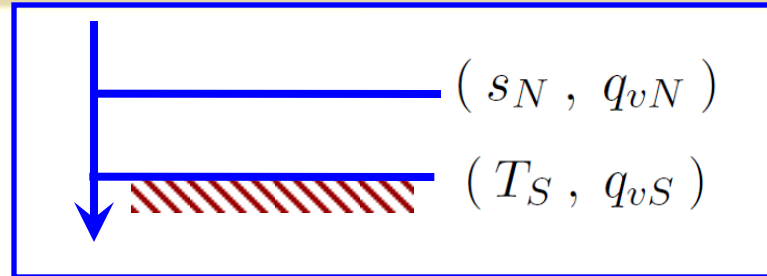
$$F_v = \overline{(\rho w)' q_v'}$$

$$F_l = \overline{(\rho w)' q_l'}$$

$$F_i = \overline{(\rho w)' q_i'}$$

# ARPEGE-NWP simulations with **ISBA** (**arp\_ground\_param**)

$$s = c_p T + \phi$$



$$\text{CSVT} = \rho C_H V_N C_T \Delta t$$

$$- (\text{CSVT}) s_N^+ + (1 + \text{CTVT}) T_s^+ - (1 + \text{CQVT}) q_{vN}^+ = T_s^- + \text{RHST}$$

$$\text{CQVT}_{(G93)} = (\text{CSVT}) (\text{CQVQ}) \left[ L_{\text{vap}}^- - (c_{pv} - c_{pd}) T_s^- \right]$$

$$\text{CQVT} = (\text{CSVT}) (\text{CQVQ}) \left[ L_h^- - (c_{pv} - c_{pd}) T_s^- \right]$$

## ARPEGE-NWP simulations with **ISBA** (**arp\_ground\_param**)

$$- (\text{CSVT}) s_N^+ + (1 + \text{CTVT}) T_s^+ - (1 + \text{CQVT}) q_{vN}^+ = T_s^- + \text{RHST}$$

$$\text{CTVT}_{(G93)} = \frac{2 \pi \Delta t}{\tau} + C_T \Delta t \left[ 4 \varepsilon \sigma (T_S^-)^3 + \rho C_H V_N \left( c_{pS}^- + \text{CTVQ} L_{\text{vap}}^- \right) \right. \\ \left. + C_T \Delta t \left[ (c_{pd} - c_{pv}) (q_{vS}^- - q_{vN}^-) \right] \right]$$

$$\text{CTVT} = \frac{2 \pi \Delta t}{\tau} + C_T \Delta t \left[ 4 \varepsilon \sigma (T_S^-)^3 + \rho C_H V_N \left( c_{pS}^- + \text{CTVQ} L_h^- \right) \right]$$

## ARPEGE-NWP simulations with **ISBA** (`arp_ground_param`)

$$- (\text{CSV T}) s_N^+ + (1 + \text{CTVT}) T_s^+ - (1 + \text{CQVT}) q_{vN}^+ = T_s^- + \text{RHST}$$

$$\begin{aligned} \text{RHST}_{(G93)} = & \frac{2 \pi \Delta t T_P}{\tau} + C_T \Delta t \left[ \varepsilon F_{\text{LW}} + (1 - a) F_{\text{SW}} + 3 \varepsilon \sigma (T_S^-)^4 \right] \\ & + (\text{CSV T}) \left[ (c_{pv} - c_{pd}) T_s^- q_{vS}^- \text{HU} - \text{RHSQ } L_{\text{vap}}^- - \phi_S^- \right] \\ & + (\text{CSV T}) \left[ \cancel{(c_{pd} - c_{pv})} \left( \cancel{q_{vS}^- - q_{vN}^-} \right) T_S^- \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RHST} = & \frac{2 \pi \Delta t T_P}{\tau} + C_T \Delta t \left[ \varepsilon F_{\text{LW}} + (1 - a) F_{\text{SW}} + 3 \varepsilon \sigma (T_S^-)^4 \right] \\ & + (\text{CSV T}) \left[ (c_{pv} - c_{pd}) T_s^- q_{vS}^- \text{HU} - \text{RHSQ } L_h^- - \phi_S^- \right] \end{aligned}$$