

**Définition des flux de chaleur sensible et latente
en terme de flux d'enthalpie.**

*Liens entre bilans d'énergie en surface
et flux turbulents atmosphériques*

Pascal MARQUET
Météo-France. CNRM-GMAP-Proc



Plan de l'exposé

1

- Rappels : bilan d'énergie en surface ; flux de chaleur sensible et latente

2

- Expressions alternatives : flux de l'enthalpie de l'air humide
Montgomery (1948) ; Businger (1982) ; Marquet (2015)

3

- Premier tests faits avec ARPEGE-PNT

4

- Conclusions-Perspectives



Plan de l'exposé

1

- Rappels : bilan d'énergie en surface ; flux de chaleur sensible et latente

2

- Expressions alternatives : flux de l'enthalpie de l'air humide
Montgomery (1948) ; Businger (1982) ; Marquet (2015)

3

- Premier tests faits avec ARPEGE-PNT

4

- Conclusions-Perspectives



Bilan d'énergie en surface

Équation pour la température de surface :

Tendance de la température de surface

$$C_g \frac{dT_{surf}}{dt} = R_{net} + (SH + LH) + G_{deep}$$

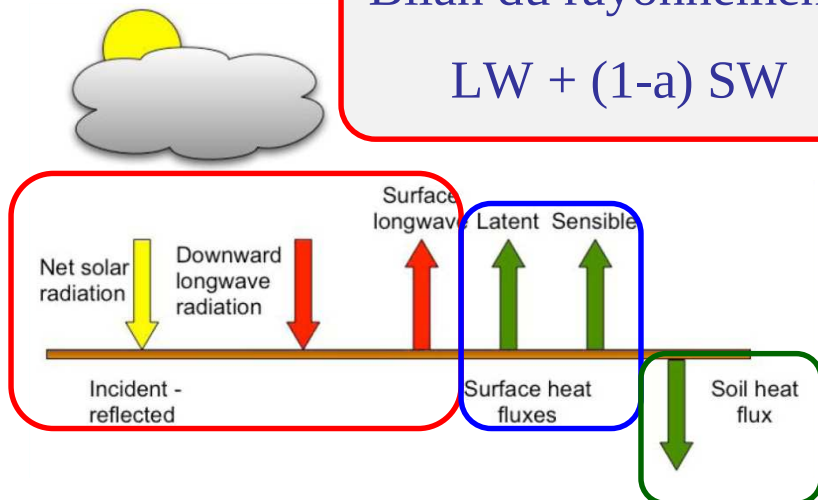
Capacité calorifique du sol

Bilan du rayonnement :
 $LW + (1-a) SW$

Flux de chaleur :
"Sensible" $SH(T)$
"Latente" $LH(q_v)$

Flux de chaleur :
sol profond

Échanges avec l'atmosphère :
Flux turbulents



METEO FRANCE

Bilan d'énergie en surface

échanges entre surface et atmosphère = flux turbulents

Question : flux turbulents de quelle(s) énergie(s) ?

- Réponses usuelles :

Flux de chaleur « sensible / T » :

$$SH \approx c_p \overline{(\rho w)'T'}$$

Flux de chaleur « latente / q_v » :

$$LH \approx L_{vap} \overline{(\rho w)'q_v'} \text{ ou } L_{sub} \overline{(\rho w)'q_v'}$$

Flux d'énergie « potentielle / $\phi = g z$ » :

$$PE \approx \overline{(\rho w)'\phi'}$$

- Autre possibilité :
(SURFEX)

$$SH + PE \approx \overline{(\rho w)'(c_p T + \phi)'} \approx c_p \left(\frac{T}{\theta} \right) \overline{(\rho w)'\theta'}$$



Plan de l'exposé

1

- Rappels : bilan d'énergie en surface ; flux de chaleur sensible et latente

2

- Expressions alternatives : flux de l'enthalpie de l'air humide
Montgomery (1948) ; Businger (1982) ; Marquet (2015)

3

- Premier test faits avec ARPEGE-PNT

4

- Conclusions-Perspectives



Bilan d'énergie en surface

Flux turbulents = échanges surface $\leftrightarrow$ atmosphère = « SH + LH + PE »

Questions : est-ce aussi évident que cela ?
peut-on le déduire de principes généraux ?

- Approche générale :

Montgomery (J. Meteor., 1948, p.265-274) "*Vertical eddy flux of heat in the atmosphere*"

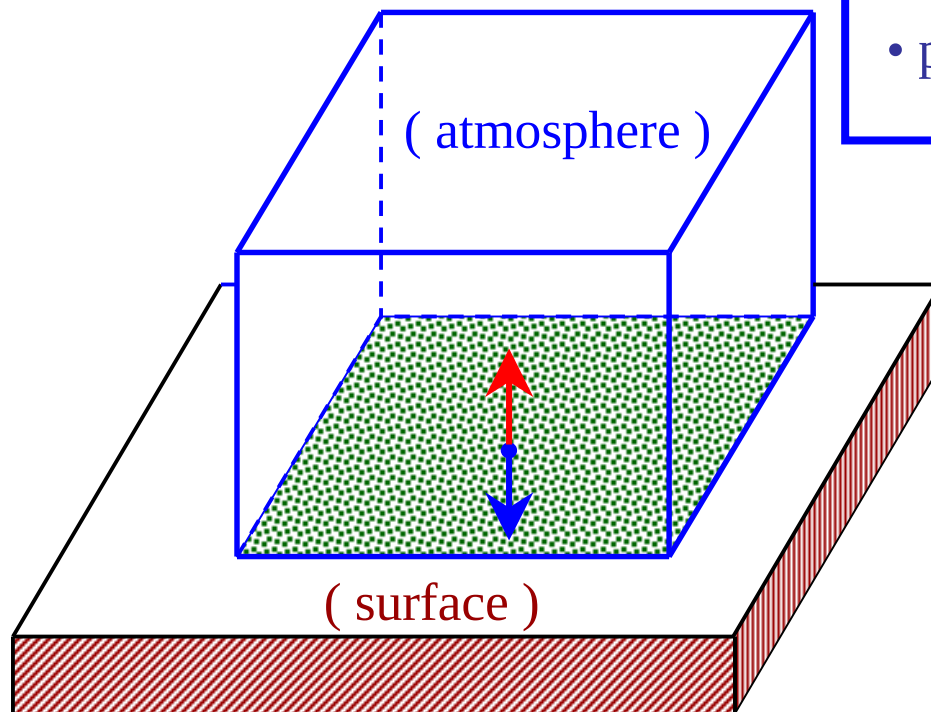
Businger (JAS, 1982, p.1889-1892) "*The fluxes of specific enthalpy, sensible heat and latent heat near the Earth's surface*"

- **Flux de chaleur** « sensible + latente » = **flux d'enthalpie de l'air humide !**
avec en plus le flux d'énergie « potentielle / $\phi = g z$ », **mais Pourquoi ?**



Bilan d'énergie en surface

- Flux turbulents d'énergie = **échanges surface** $\leftrightarrow$ **atmosphère**
- Chaleur **reçue** par la surface = celle **perdue** par l'atmosphère



- cinétique $e_{cin} = (u^2 + v^2 + w^2) / 2$
- interne $e_{int}(T, q_v, q_l, q_i)$
- potentielle $e_{pot} = \phi = g z$

Principes généraux :

- 3 formes d'énergies
- 3 équations de bilan



Bilan d'énergie en surface

- Flux turbulents d'énergie = **échanges surface** $\leftrightarrow$ **atmosphère**
- Chaleur **reçue** par la surface = celle **perdue** par l'atmosphère

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho (e_{\text{int}} + \phi + e_{\text{cin}})] + \text{div} [\rho (h + \phi + e_{\text{cin}}) \vec{U}] = \text{div} (-F_{\text{rad}}) + (\dots)$$

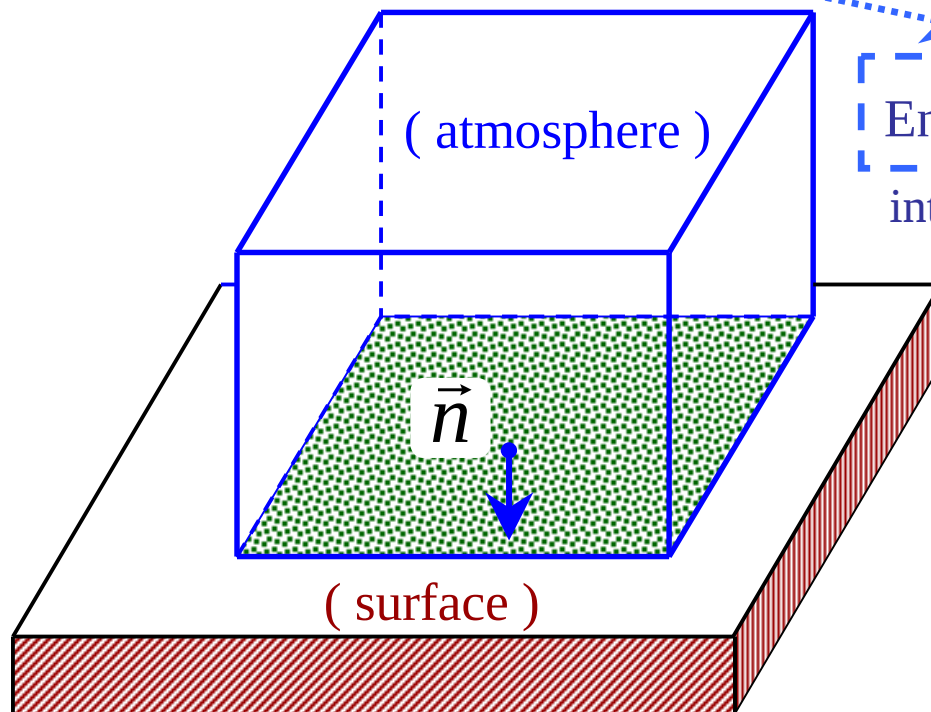
bilan local des 3 énergies

Enthalpie : $h = e_{\text{int}} + p / \rho$

intégration 3D globale + Green-Ostrogradski :

$$\frac{\partial E_{\text{tot}}}{\partial t} = - \overline{\rho w (h + \phi)} - \overline{F_{\text{rad}}} - \overline{\rho w e_{\text{cin}}}$$

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{int}} + E_{\text{pot}} + E_{\text{cin}}$$

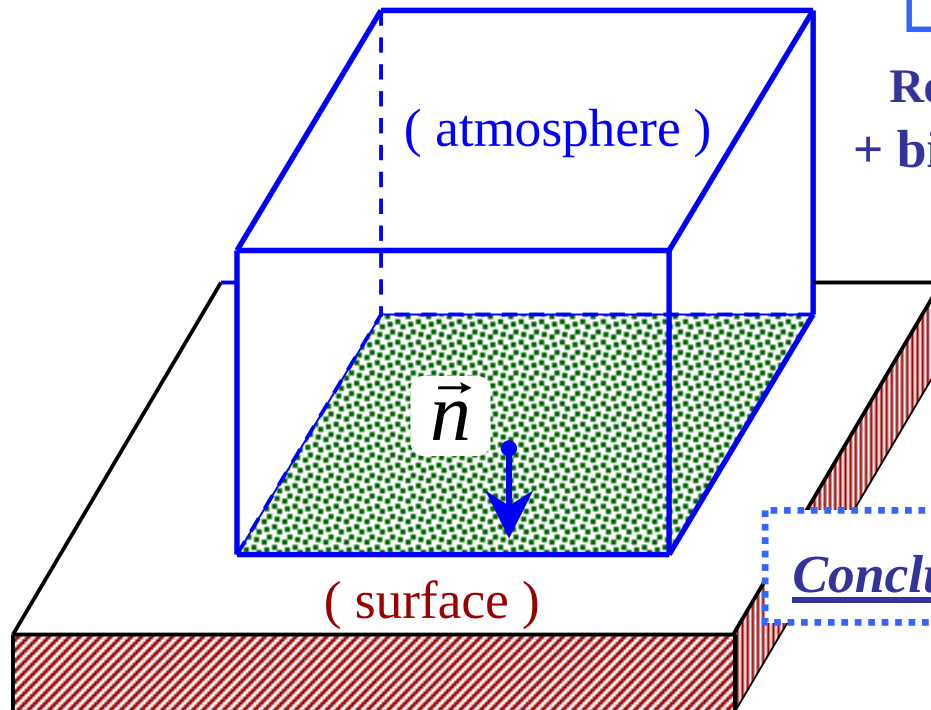


Bilan d'énergie en surface

- Flux turbulents d'énergie = **échanges surface** $\leftrightarrow$ **atmosphère**
- Chaleur **reçue** par la surface = celle **perdue** par l'atmosphère

$$E_{tot} = E_{int} + E_{pot} + E_{cin}$$

$$\text{Enthalpie : } h = e_{int} + p / \rho$$



$$\frac{\partial E_{tot}}{\partial t} = - \overline{\rho w (h + \phi)} - \overline{F_{rad}} - \overline{\rho w e_{cin}}$$

Reynolds : $\overline{\rho w X} = \overline{\rho w} \overline{X} + \overline{(\rho w)' X'}$
+ bilan en surface :

$$C_g \frac{dT_{surf}}{dt} = R_{net} + G_{deep} + \overline{(\rho w)' h'} + \overline{(\rho w)' \phi'} + \overline{(\rho w)' (tke)'}$$

Conclusion : (SH+LH) = flux de ($h + \phi$) ?

Plan de l'exposé

1

- Rappels : bilan d'énergie en surface ; flux de chaleur sensible et latente

2

- Expressions alternatives : flux de l'enthalpie de l'air humide
Montmogery (1948) ; Businger (1982) ; **Marquet** (2013, 15)

3

- Premier test faits avec ARPEGE-PNT

4

- Conclusions-Perspectives



Calculs de l'enthalpie de l'air humide " h "

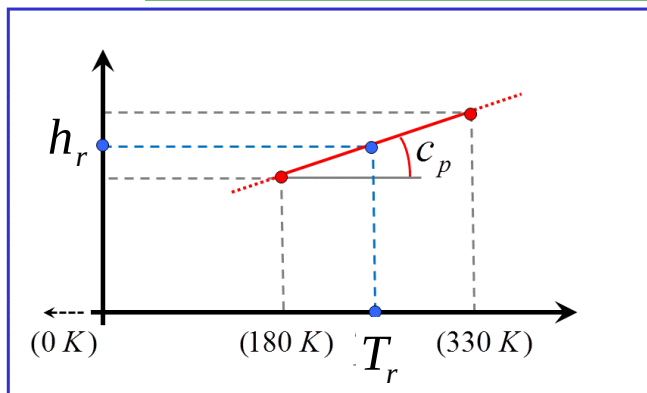
Enthalpie spécifique = une somme pondérée :

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

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	→	$h_i = (h_i)_r + c_i (T - T_r)$

Montgomery et Businger = difficultés
pour calculer " h ", car il faut connaître les
valeurs de références $(h_d)_r / (h_v)_r / \dots$
à multiplier par $q_d / q_v / \dots$ variables !

Une solution possible = « 3ème principe » : **$h=0$ pour $T=0$ K**
(Marquet : AMA- janvier 2013 / QJRMS early-view 2015)



Calculs de l'enthalpie de l'air humide "h"

(Marquet : AMA- janvier 2013 / QJRMS early-view 2015)

Au final on trouve :

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

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

(une vraie constante)

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

Une nouvelle « **chaleur latente** »
en fait la « différence d'enthalpie
entre l'air sec et la vapeur d'eau »

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

Chaleur latente de vaporisation
(différence entre les enthalpies)

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

Chaleur latente de sublimation
(différence entre les enthalpies)

→ Impacts dans l'atmosphère du remplacement de l'air sec
par de la vapeur d'eau (si évaporation ou sublimation au sol)



Calculs du flux d'enthalpie de l'air humide

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

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

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

$$F_h = c_p F_T + L_h F_v$$

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

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

Flux d'enthalpie

Flux de "chaleur sensible"

Flux de "chaleur latente"

Problème : comment calculer :

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



METEO FRANCE

Diagramme des chaleurs latentes L_{vap} et L_{sub}

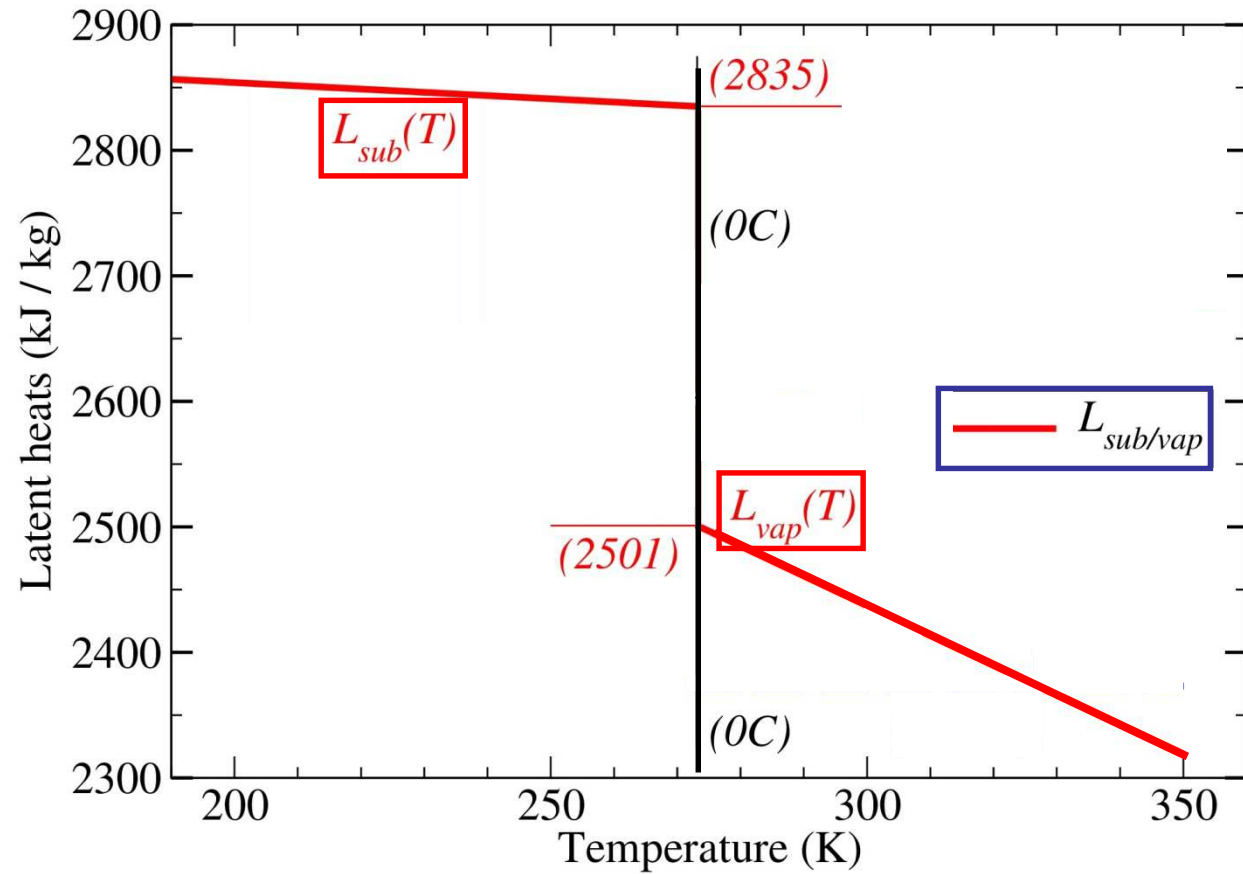
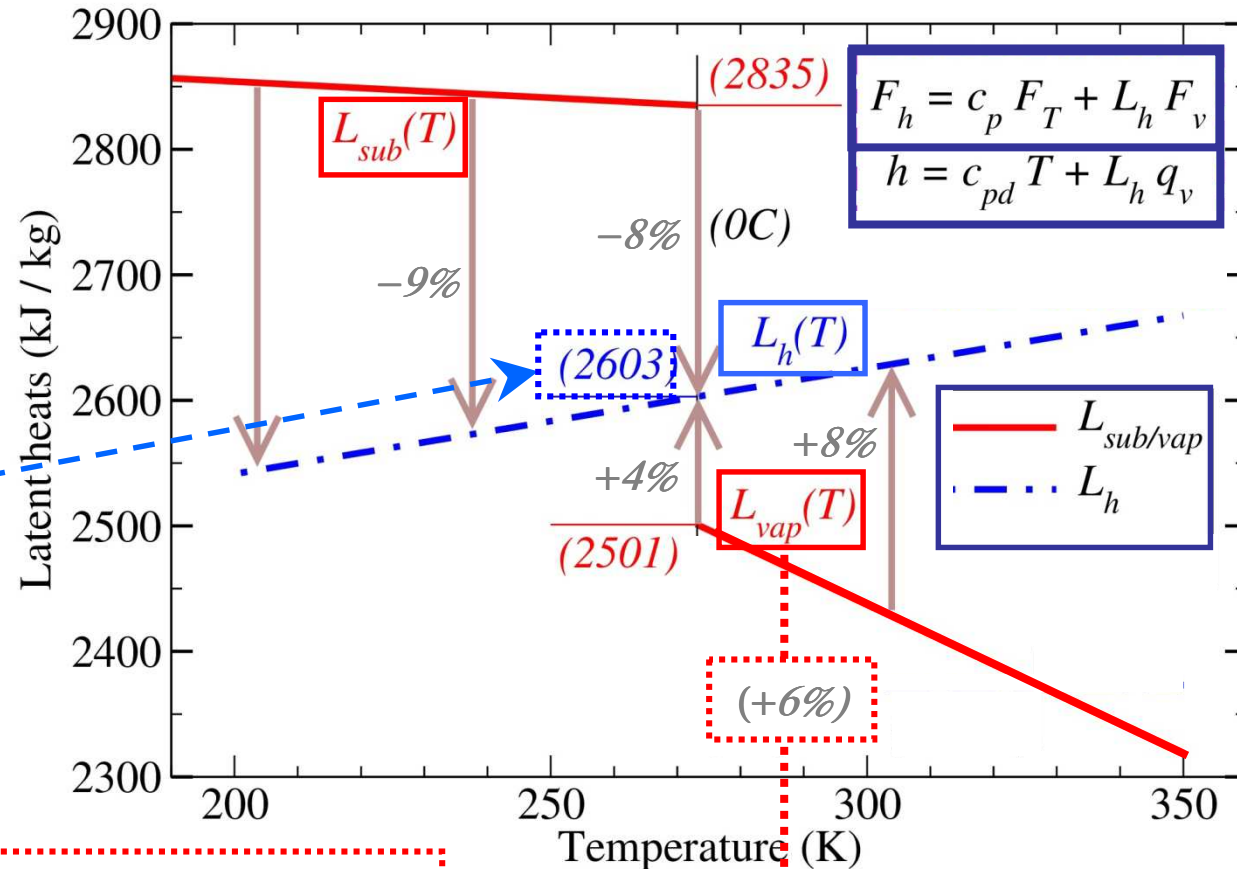


Diagramme des chaleurs latentes L_{vap} , L_{sub} et L_h

$$\begin{aligned} h_d(T_0) &\approx 530 \text{ kJ kg}^{-1}, \\ h_v(T_0) &\approx 3133 \text{ kJ kg}^{-1}, \\ h_l(T_0) &\approx 632 \text{ kJ kg}^{-1}, \\ h_i(T_0) &\approx 298 \text{ kJ kg}^{-1}. \end{aligned}$$

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

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



$$\begin{aligned} F_h &= c_p F_T + L_h F_v \\ h &= c_{pd} T + L_h q_v \end{aligned}$$

$L_h(T)$ proche et intermédiaire
entre $L_{vap}(T)$ et $L_{sub}(T)$!

en moyenne $\Delta(LE) \approx +6\%$?



METEO FRANCE

Plan de l'exposé

1

- Rappels : bilan d'énergie en surface ; flux de chaleur sensible et latente

2

- Expressions alternatives : flux de l'enthalpie de l'air humide

Montmogery (1948) ; Businger (1982) ; Marquet (2015)

3

- Premier tests faits avec ARPEGE-PNT

4

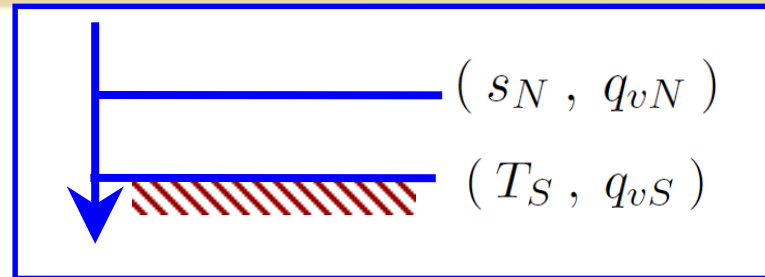
- Conclusions-Perspectives



Simulations ARPEGE-PNT avec **ISBA** (arp_ground_param)

$$s = c_p T + \phi$$

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



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

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

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



Simulations ARPEGE-PNT avec **ISBA** (arp_ground_param)

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

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

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



Simulations **ARPEGE-PNT** avec **ISBA (arp_ground_param)**

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

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

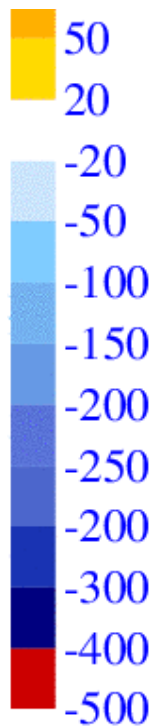
$$\begin{aligned} \boxed{\text{RHST}} = & \frac{2 \pi \Delta t T_P}{\tau} + C_T \Delta t \left[\varepsilon F_{\text{LW}} + (1 - a) F_{\text{SW}} + 3 \varepsilon \sigma (T_S^-)^4 \right] \\ & + (\text{CSV T}) \left[(c_{pv} - c_{pd}) T_s^- q_{vS}^- \text{HU} - \text{RHSQ } L_h^- - \phi_S^- \right] \end{aligned}$$



Simulations **ARPEGE-PNT**
ISBA (arp_ground_param)

T1198 / c2.2 / T105

Flux « latent » : LH
moyennes [J+1/J+2/J+3]

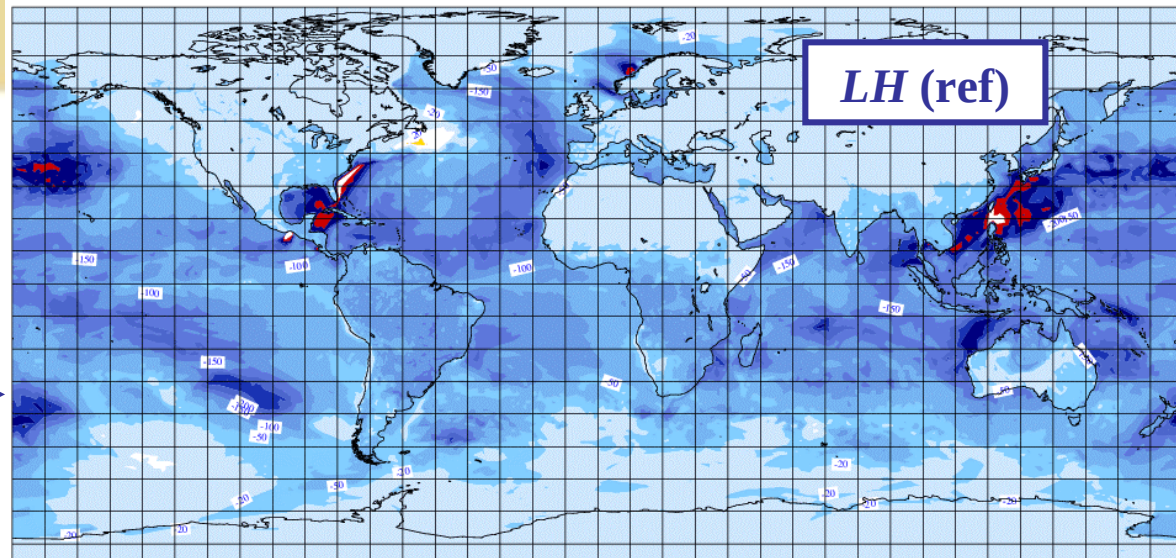


LH (ref) :
 -93.74 W/m^2

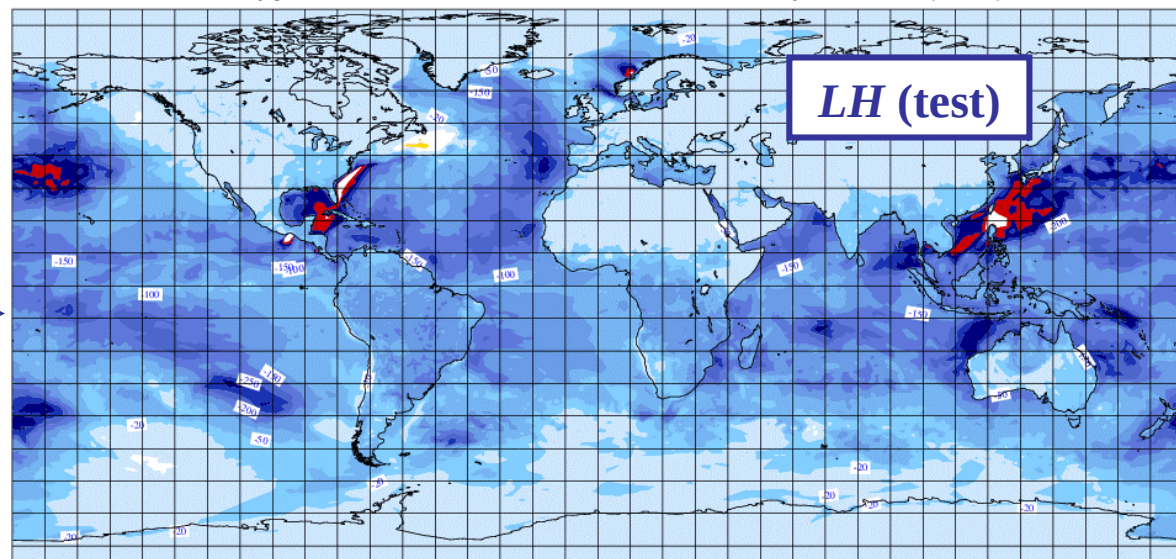
$\Delta(LH) :$
 -6.1 W/m^2
 $< 0 \rightarrow \text{Atm.}$
 $(+6.4\%)$

LH (test) :
 -100.04 W/m^2

Enthalpy fluxes / 20140115 / r0 / 24-96h / LH / exper: STD2 (7DI2)



Enthalpy fluxes / 20140115 / r0 / 24-96h / LH / exper: TST1 (7DI3)



ARPEGE-PNT / ISBA
(arp_ground_param)

T1198 / c2.2 / T105

$-\Delta(LH)$ et
 $\Delta(GLOBAL)$ TOA-SFC
moyennes [J+1/J+2/J+3]

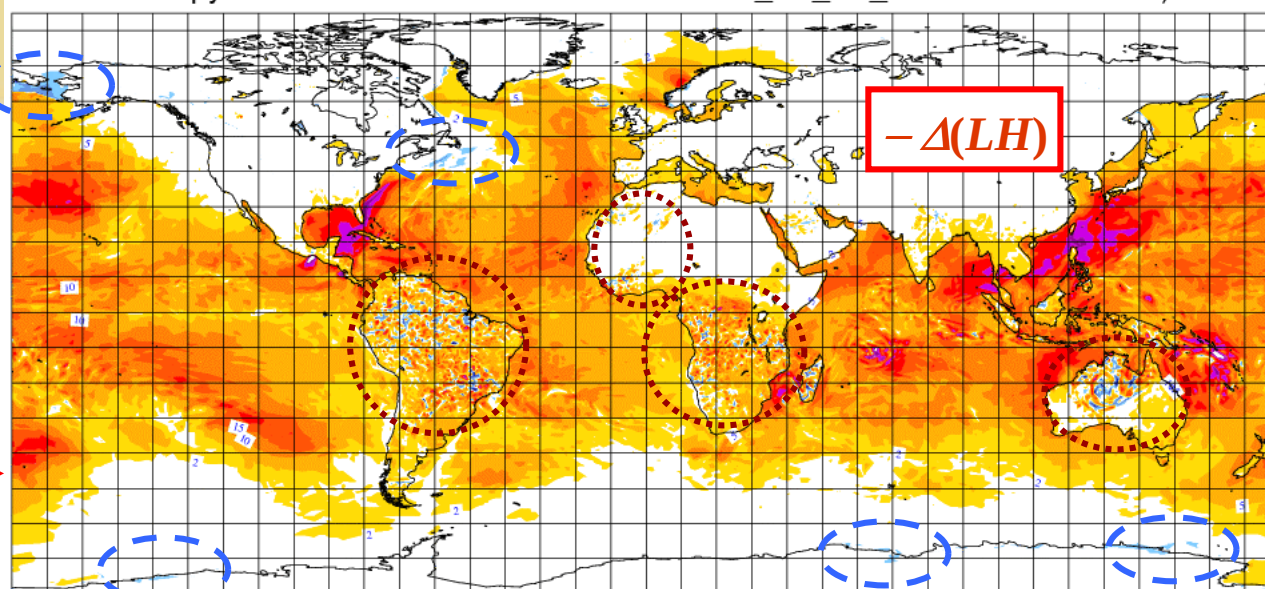


$-\Delta(LH) :$
 $+6.1 \text{ W/m}^2$

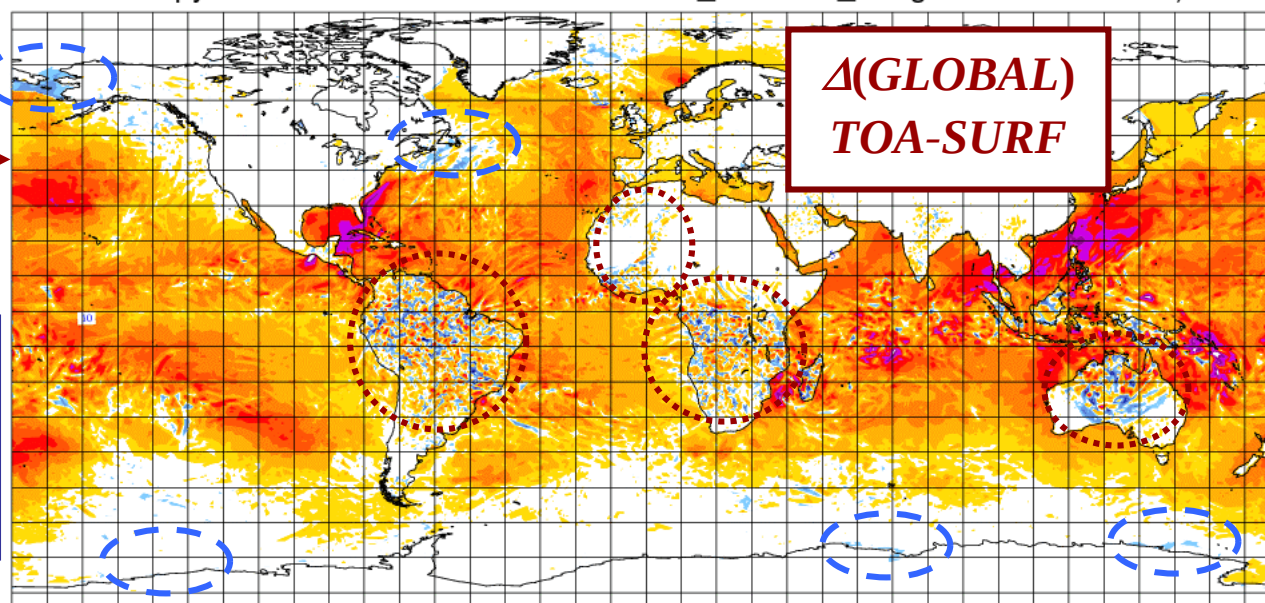
$\Delta(GLOBAL)$
TOA-SURF :
 $+5.8 \text{ W/m}^2$

	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)



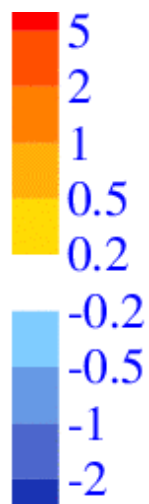
ARPEGE-PNT / ISBA
(arp_ground_param)

T1198 / c2.2 / T105

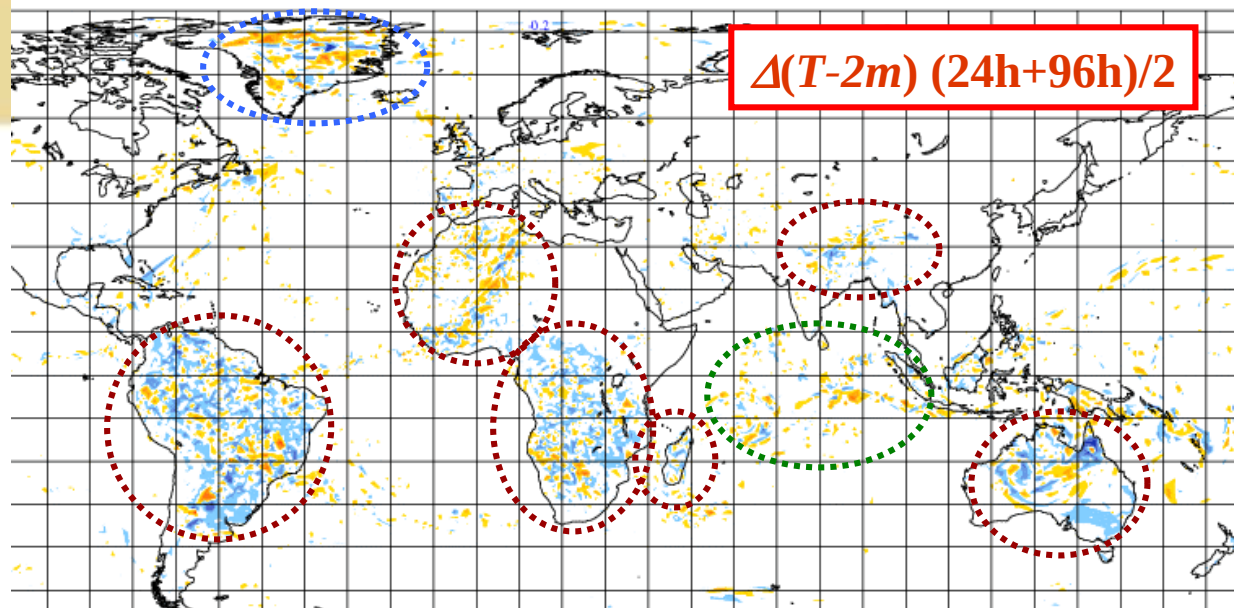
$\Delta(T-2m)$

moyenne (J+1) et (J+4)

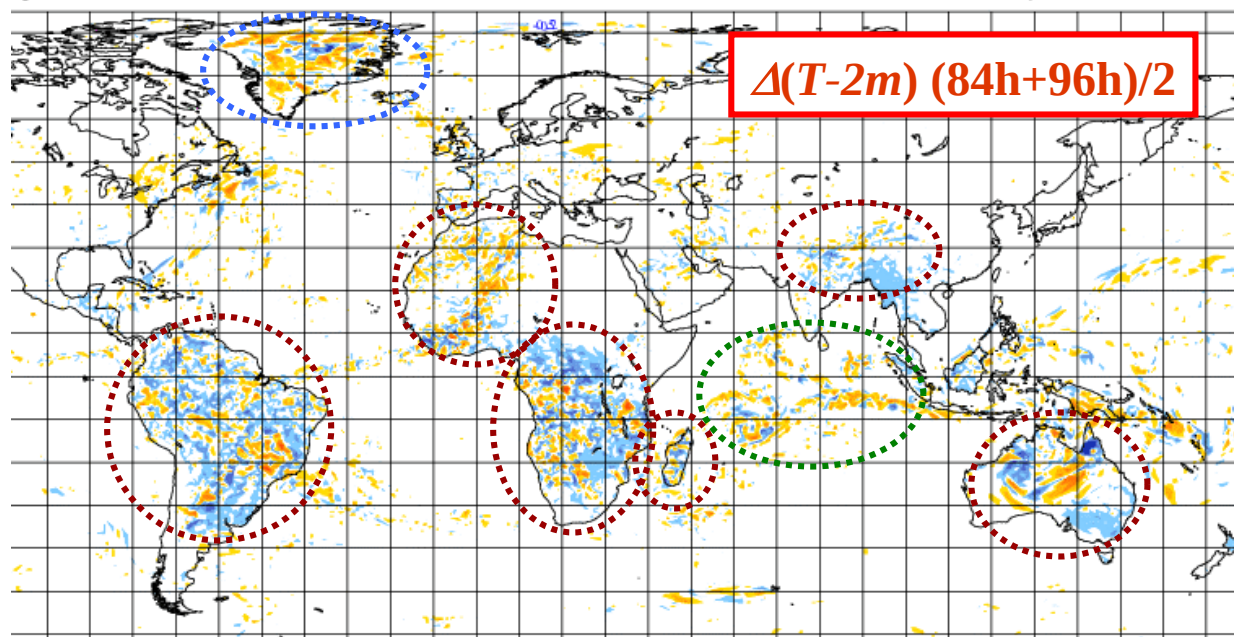
moyenne (J+3) et (J+4)



by fluxes / 20140115 / r0 / 24-96h / diff_T_2m / diff: 7DI3-7DI2)



by fluxes / 20140115 / r0 / 84-96h / diff_T_2m / diff: 7DI3-7DI2)



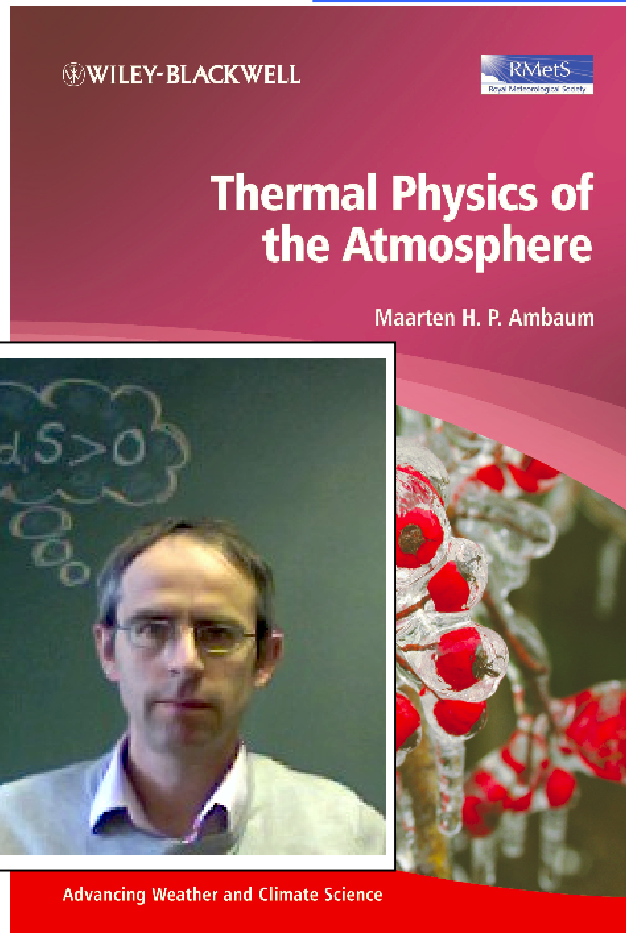
Conclusions - Perspectives

- Il est donc possible de calculer le flux d'enthalpie (de l'air humide)
- On trouve $F_h \approx c_p F_T + L_h F_v$ avec L_h différent/proche de L_{vap} et L_{sub}
- Ce flux d'enthalpie est du type "SH" + "LH" / impact $\approx 6 \text{ W/m}^2$ pour " $L_h F_v$ "
- Pas si faible que ça (6%) / et $L_h(\underline{T})$ / avec un changement de paradigme ...
→ explications physiques pour L_h différent/proche de L_{vap} et L_{sub} ?
- Proche de ISBA-ARPEGE où $SH+LH = c_p \langle w' T' \rangle + \langle w' \phi' \rangle + L_{vap} \langle w' q_v' \rangle$
- Peut-être moins simple pour SURFEX, car $\neq c_p \langle w' \theta' \rangle + L_{vap} \langle w' q_v' \rangle$
→ donc liens moins évidents avec les flux turbulents du type $c_p \langle w' \theta_1' \rangle$?
- Facile de prendre en compte $q_i \neq 0$ et $q_i \neq 0$ dans F_h (brouillard)
- Impacts sur l'équation de T_{surf} , mais aussi sur les bilans atmosphériques !



Merci / Questions ?

Maarten Ambaum (2010) / Ass. Prof. Univ. Reading



“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”.



METEO FRANCE



Calculs (complet) du flux d'enthalpie de l'air humide

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

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

Version humide

$\approx +2600 \text{ kJ/kg}$

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

$$F_h = c_p F_T + L_h F_v$$

$\approx +150 \text{ kJ/kg}$

$$+ (L_h - L_{vap}) F_l$$

$\approx -250 \text{ kJ/kg}$

$$- (L_{sub} - L_h) F_i$$

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

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

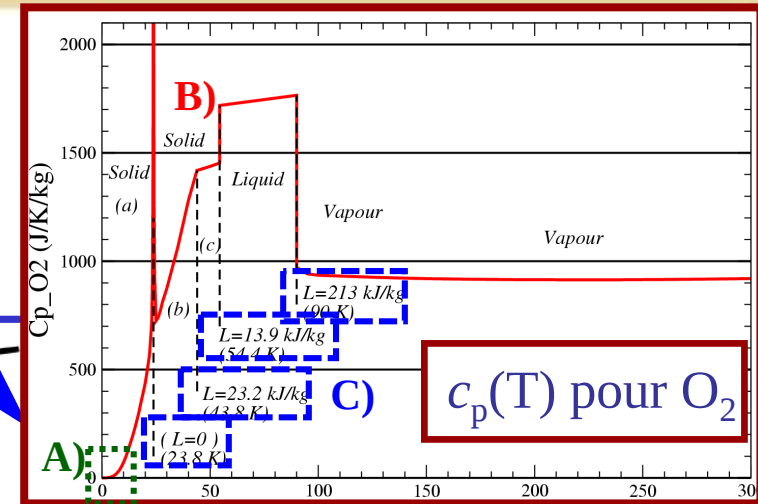
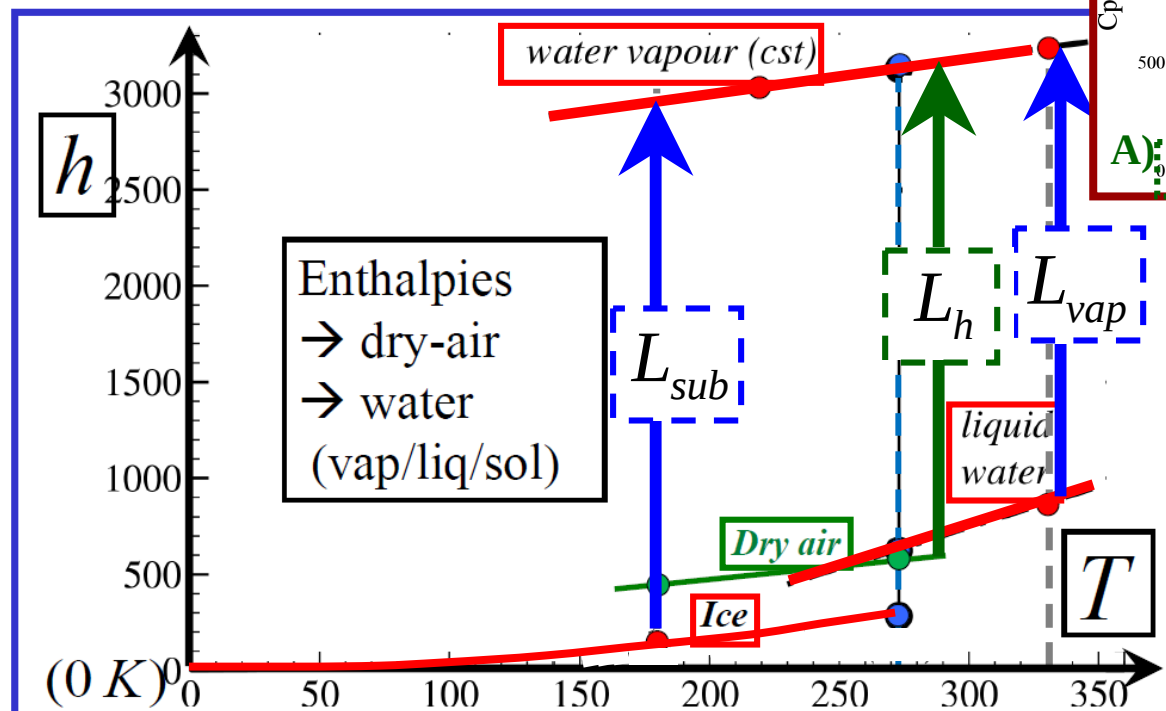
$$F_l = \overline{(\rho w)' q_l'}$$

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



Calculs de $L_h = h_v - h_d$: enthalpies de référence ou standard ?

$$h^0(T_0) = \underbrace{h(T=0)}_{\text{A)}} + \underbrace{\int_0^{T_0} c_p(T) dT}_{\text{B)}} + \underbrace{\sum_k L_k}_{\text{C)}}$$



$$\begin{aligned} h_d(T_0) &\approx 530 \text{ kJ kg}^{-1}, \\ h_v(T_0) &\approx 3133 \text{ kJ kg}^{-1}, \\ h_l(T_0) &\approx 632 \text{ kJ kg}^{-1}, \\ h_i(T_0) &\approx 298 \text{ kJ kg}^{-1}. \end{aligned}$$





METEO FRANCE