3,5 / 2,5 / 5 / 7,5 / 18,5

NOM : [redacted]

Barème : *1: 3,5 points* *2 : 4 points* *3 : 5 points* *4 : 7,5 points*

1 Traitement d'air

En hiver, à Val d'Isère, l'air extérieur (A) est froid et proche de la saturation (température sèche 0 °C, humidité relative 90 %). Cet air est introduit à l'intérieur d'une pièce et chauffé jusqu'à 20 °C (B). On ajoute ensuite à cet air 4,6 g/kg$_{\text{air sec}}$ (C). La pression absolue vaut P = 100 000 Pa.

1.1 Représentez ces évolutions sur le diagramme de l'air humide ci-joint.

1.2 Évaluez la variation d'enthalpie au cours des deux transformations **AB** et **BC**, ainsi que la variation totale d'enthalpie.

1.1 cf diagramme.

1.2 on a $q'_A = 9$ kJ/kg AS d'après diagramme.

$q'_B = 29$ kJ/kg AS

$q'_C = 40$ kJ/kg AS

D'où $\Delta H_{AB} = q'_B - q'_A = 29 - 9 = 20$ kJ/kg AS.

$\Delta H_{BC} = q'_C - q'_B = 11$ kJ/kg AS

$\Delta H_{tot} = \Delta H_{AB} + \Delta H_{BC} = 31$ kJ/kg AS.

1.3 Évaluez pour chacune des trois étapes :

- l'humidité relative ε
- l'humidité spécifique ω
- la température humide t'

humidité relative ε, humidité spécifique ω, température ~~relative~~ humide t'

1. première étape $\varepsilon = 90\,\%$

$\omega = 0{,}0035$ kg d'humidité/kg AS.

$t' = 0{,}5\,°C$

/

1. Seconde étape $\varepsilon = 25\,\%$

$\omega = 0{,}0035$ kg d'humidité/kg AS.

$t' = 9{,}5\,°C$

/

1. Dernière étape $\varepsilon = 55\,\%$

$\omega = 0{,}0081$ kg d'humidité/kg AS

$t' = 14{,}5\,°C$

/

2 Écoulement d'air

On considère un débit volumique d'air humide q_v = 5 m³/s, de température sèche t_s = 20 °C et d'humidité relative ε = 60 %. La pression totale est P = 101 500 Pa. Calculez :

2.1 La pression partielle d'air sec P_{as}

2.2 La pression partielle de vapeur d'eau P_{vp}

2.3 L'humidité spécifique w

2.4 La masse volumique ρ

2.5 Le volume spécifique v'

2.6 L'enthalpie spécifique q'

2.7 Le débit massique d'air humide q_m

2.8 Le débit massique d'air sec $q_{m\,as}$

2.1

$$\varepsilon = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \text{ à } 20°C$$

on a $P = P_{as} + P_{vp} = P_{as} + \varepsilon P_{vs}$

$P_{as} = P - P_{vs}\,\varepsilon$.

$= 101\,500 - 2337 \times 60\% = \underline{100\,098 \text{ Pa}}$.

.2 $P_{vp} = P - P_{as} = \underline{1402 \text{ Pa}}$.

.3 $w = 0{,}622 \dfrac{P_{vp}}{P - P_{vp}} = 0{,}622 \times \dfrac{1402}{101500 - 14{,}02} \simeq \underline{0{,}008}$ kg/kg as

.4 Masse volumique.

$$\rho = \frac{P}{287 \times T} - 1{,}32\ 10^{-3} \frac{P_{vp}}{T}$$

$$\rho = \frac{101\,500}{287 \times (273+20)} - 1{,}32\ 10^{-3} \times \frac{101\,500}{293} = \underline{0{,}75 \text{ kg/m}^3}$$

.5 $v' = 462\,(0{,}622 + w)\dfrac{T}{P} = 462\,(0{,}622 + 0{,}0087)\dfrac{293}{101500}$

$\underline{v' = 0{,}84 \text{ m}^3/\text{kg AS}}$.

6 $q' = t + w\,(2498 + 1{,}83\,t)$

$= 20 + 0{,}0087\,(2498 + 1{,}83 \times 20) = \underline{42{,}05 \text{ kJ/kg AS}}$.

.7 Débit massique d'air humide :

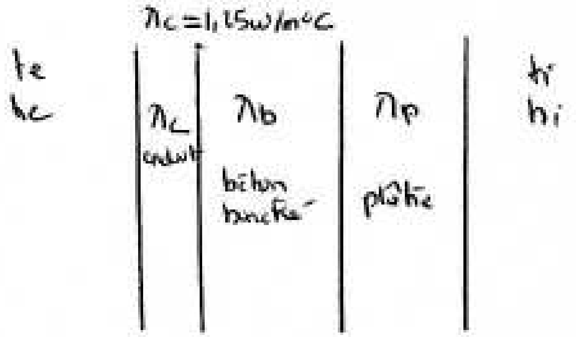
$q_m = \rho_m\, q_v = \underline{0{,}75 \times 3{,}75 \text{ m}^3/\text{s}} \simeq \underline{2{,}81 \text{ m}^3/\text{s}}$

.8 Débit massique d'air sec $q_{m\,as}$

3 Paroi de bâtiment

Une paroi de bâtiment est constituée de 1,5 cm d'enduit ciment (λ_c = 1,25 W/m.°C), de 20 cm de béton banché (λ_b = 1,75 W/m.°C) et de 1,5 cm d'enduit plâtre (λ_p = 0,35 W/m.°C). Les coefficients d'échanges superficiels valent : à la surface intérieure h_i = 10 W/m².°C, à la surface extérieure h_e = 20 W/m².°C. La température de l'air intérieur est t_i = 20 °C, la température de l'air extérieur est t_e = 0 °C.

3.1 Déterminez la résistance thermique globale de la paroi et sa conductance. Calculez la densité de flux thermique échangée entre l'intérieur et l'extérieur.



c'est une association en série donc

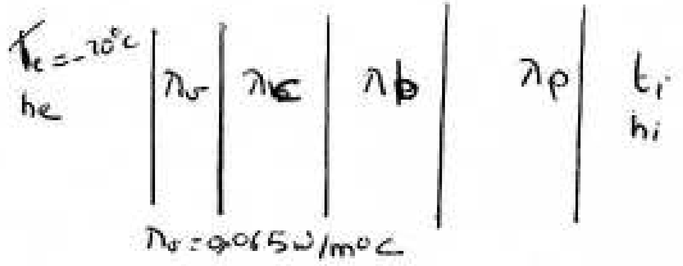
$$R_T = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \sum_i \left(\frac{e_i}{\lambda_i}\right) = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \frac{e_c}{\lambda_c} + \frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{e_p}{\lambda_p}$$

$$R_T = 0,32 \ K W^{-1} m^2.$$

$$\text{et } K_T = \frac{1}{R_T} = 3,13 W m^{-2} K^{-1}$$

$$\text{d'où } \boxed{\phi_{\substack{\text{thermique}\\ \text{échangé}}} = \frac{T_i - T_e}{R_T} \simeq 62,7 \ W/m^2}$$

3.2 La température extérieure est maintenant t_e = -20 °C. On ajoute à la paroi un isolant de conductivité λ_v = 0,065 W/m.°C. Calculez l'épaisseur minimale d'isolant permettant de maintenir le même flux entre l'intérieur et l'extérieur.



on est toujours en série $R'_T = R_T + \dfrac{x}{\lambda_v}$.

$$\phi'_{ech} = \frac{T_i - T_e'}{R'_T} = \frac{T_i - T_e}{R_T}$$

$$\rightarrow 1 + \frac{x}{R_T \lambda_v} = \frac{T_i - T_e'}{T_i - T_e}$$

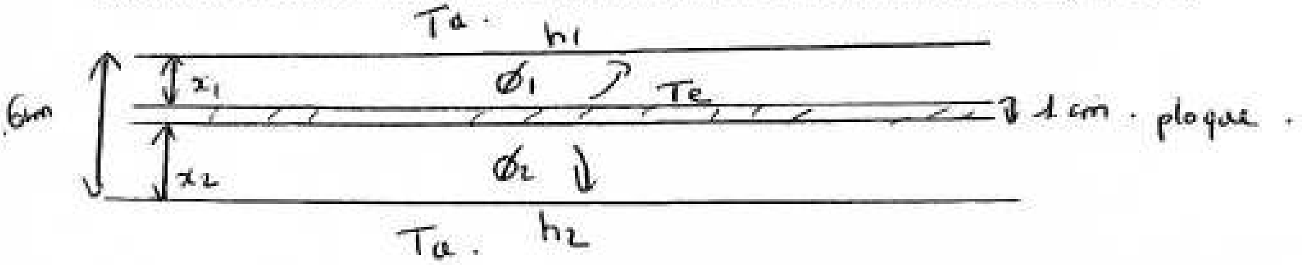
$$\rightarrow x = R_T \lambda_v \left(\frac{T_i - T_e'}{T_i - T_e} - 1 \right)$$

d'où $x \simeq 2$ cm.

4 Plancher chauffant

Un système de chauffage électrique par plancher est constitué de câbles électriques chauffants (que l'on pourra assimiler à une plaque de 1 cm d'épaisseur) noyés dans une dalle de béton (d'une épaisseur totale de 16 cm) de conductivité thermique $\lambda = 1{,}2$ W/m.°C. On appelle x_1 la distance de la nappe électrique chauffante à la surface supérieure, x_2 sa distance à la surface inférieure ; dans ces conditions, on a : $x_1 + x_2 + 0{,}01 = 0{,}16$ [m]. Le flux de chaleur, par unité de surface, créé par le câble électrique Φ est de 100 W/m². Ce flux se partage entre un flux ascendant Φ_1 (chauffage par le plancher) et un flux descendant Φ_2 (chauffage par le plafond). Les coefficients d'échange superficiel globaux (convection et rayonnement) des surfaces horizontales sont respectivement $h_1 = 10{,}6$ W/m².°C pour la surface supérieure et $h_2 = 8{,}6$ W/m².°C pour la surface inférieure. La température ambiante T_a de l'air de chaque côté du plancher est de 18 °C. De plus, la température de l'élément chauffant est supposée uniforme et égale à T_e.

4.1 Afin d'obtenir une densité de flux maximale émise par le plancher Φ_1, tout en sachant que la température superficielle du sol T_1 ne doit pas dépasser (réglementairement) 24 °C, déterminez la position du plancher chauffant x_1. Calculez dans ce cas les valeurs de Φ_1, Φ_2, T_e et T_2.



$$\phi_1 = \frac{T_2 - T_1}{\frac{x_1}{\lambda}}$$

avec la conservation du flux on a $\phi_1 = \dfrac{T_e - T_1}{x_1/\lambda} = \dfrac{T_1 - T_a}{1/h_1}$ $\boxed{1}$

donc $\phi_1 = \dfrac{T_1 - T_a}{1/h_1} = \underline{63{,}6 \text{ W/m2}}$

$$\phi_2 = \frac{T_e - T_2}{\frac{x_2}{\lambda}} = \frac{T_2 - T_a}{1/h_2} \quad \boxed{II}.$$

$$T_2 = \frac{1}{h_2}\phi_2 + T_a = 22,2°C$$

$$\phi_2 = \frac{T_2 - T_a}{1/h_2} = \underline{36,4\ W/m^2}.$$

$$T_e - T_1 = \frac{x_1}{\lambda}\phi_1$$

Des 2 équations $\boxed{I}$ et $\boxed{II}$ on a $\quad T_e = \phi_2\left(\frac{x_2}{\lambda}\right) + T_2 = \phi_2\left(\frac{0,15 - x_1}{\lambda}\right) + T_2$

$$\text{et } \frac{\phi_1 x_1}{\lambda} = \phi_2\left(\frac{0,15 - x_1}{\lambda}\right) + T_2 - T_1$$

$$\Rightarrow \frac{x_1}{\lambda}\underbrace{(\phi_1 + \phi_2)}_{100\,W/m^2} = \phi_2 \frac{0,15}{\lambda} + T_2 - T_1$$

$$\Rightarrow x_1 = \frac{0,15 \times \phi_2 + (T_2 - T_1)\lambda}{100}.$$

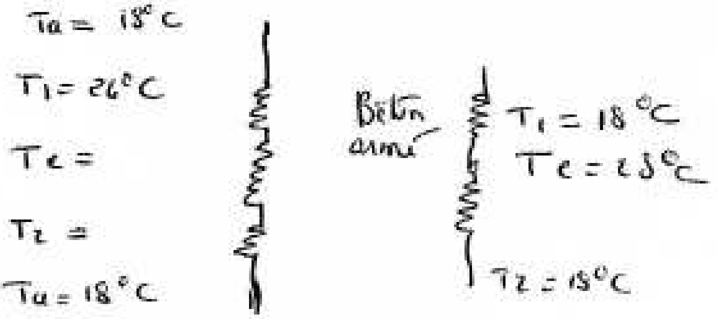
A.N $\quad \underline{x_1 \simeq 3,4\ cm}.$

$$\Rightarrow T_e = 36,4\,(0,15 - 0,034 + 1,2) \simeq \underline{25,7°C}.$$

4.2 Dans le cas précédent, quelle est, lors de l'arrêt du chauffage, l'énergie calorifique accumulée et restituée (par m² de dalle) dans une ambiance à 18 °C au bout d'un temps infini ? On négligera l'accumulation de chaleur dans la résistance chauffante.

Masse volumique du béton armé: ρ = 2 200 kg/m³ Chaleur massique du béton armé: c = 960 J/kg.°C

Analogie électrique



l'énergie $d^2Q = \rho c\, dx\, (T(x) - T)$

Partie haute $(T_e - T(x)) = \frac{x}{\lambda}\phi$ où $\phi = \frac{\lambda}{x_1}(T_e - T_1)$

$$T(x) = T_e\left(1 - \frac{x}{x_1}\right) + \frac{x}{x_1} T_1$$

Pour un temps infini, l'énergie calorifique dégagée :

$$E_1 = \int_0^x \rho c \left(T_e\,(1 - x/x_1) + \frac{x}{x_1} T_1 - 18\right) dx$$

$$= \rho c \left[7,7 \times x - \frac{1,78}{0,034} \cdot \frac{x^2}{2}\right]_0^{0,034}$$

$\Rightarrow E_1 \simeq 480$ kJ

Pour la partie basse on a $E_2 = \rho c \int_0^{x_2} T_e\left(1 - \frac{x}{x_2}\right) + \frac{x}{x_2} T_2 - 18\, dx$

avec $x_2 = 0,16 - 0,01 - 0,034 \simeq 0,107$ m.

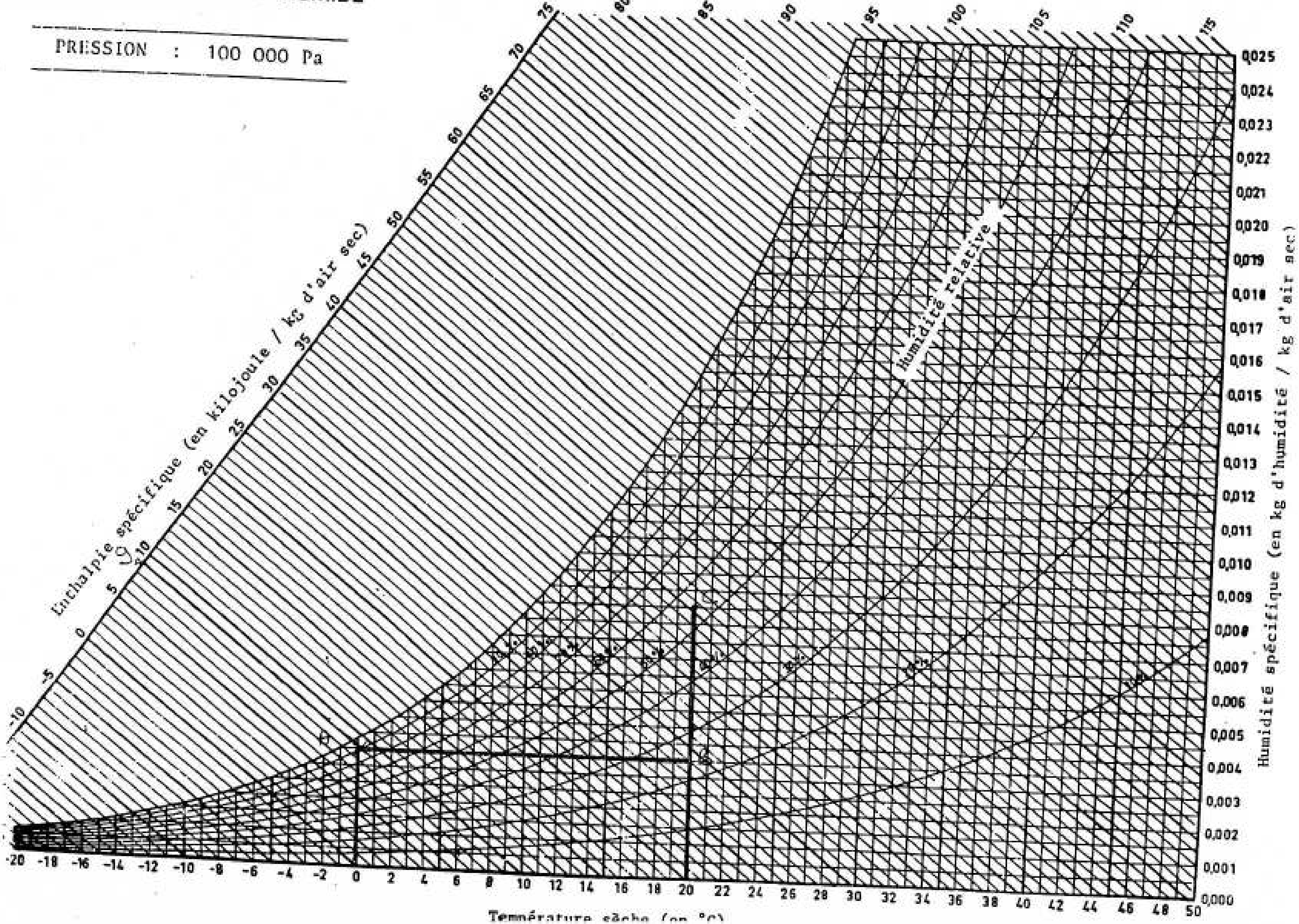
$$E_2 = \rho c \int_0^{0,107} 25,8 - 18 + \frac{x}{x_2} \cdot (22,2 - 25,8)\, dx$$

$E_2 \simeq 1,3$ MJ

$\Rightarrow E = E_1 + E_2 \simeq 1,84$ MJ

DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

PRESSION : 100 000 Pa



TEMPE-RATURE [°C]	PRESSION DE VAPEUR SATURANTE [Pa]	TEMPE-RATURE [°C]	PRESSION DE VAPEUR SATURANTE [Pa]
0	610,7	41	7 776,3
1	656,6	42	8 197,3
2	705,5	43	8 637,9
3	757,5	44	9 098,8
4	813,1	45	9 580,7
5	872,1	46	10 084
6	934,9	47	10 610
7	1 001,6	48	11 160
8	1 072,4	49	11 734
9	1 147,7	50	12 333
10	1 227,5	51	12 959
11	1 312,2	52	13 611
12	1 401,9	53	14 291
13	1 497,1	54	15 000
14	1 597,8	55	15 739
15	1 704,5	56	16 509
16	1 817,3	57	17 311
17	1 936,7	58	18 1[illegible]
18	2 062,3	59	19 014
19	2 196,2	60	19 918
20	2 337,0	61	20 859
21	2 485,6	62	21 837
22	2 642,5	63	22 853
23	2 807,9	64	23 910
24	2 982,3	65	25 008
25	3 166,1	66	26 140
26	3 359,7	67	27 332
27	3 563,6	68	28 562
28	3 778,2	69	29 837
29	4 003,9	70	31 161
30	4 241,3	71	32 534
31	4 490,8	72	33 958
32	4 753,0	73	35 434
33	5 028,4	74	36 963
34	5 317,5	75	38 540
35	5 620,9	76	40 190
36	5 939,3	77	41 891
37	6 273,1	78	43 651
38	6 623,1	79	45 474
39	6 989,8	80	47 360
40	7 374,0		