



Supports de cours

Echangeurs de chaleur et de matière

Humidification de l'air

Phelma EPEE 2A 2023-2024
Raphaël BOICHOT

Echangeurs de chaleur et de matière

Humidification de l'air

Bibliographie :

Bird, Stewart, Lightfoot : Transport Phenomena

Taylor, Krishna : Multicomponent Mass Transfer

Treybal : Mass Transfer Operations

Introduction - Généralités

Tous les procédés faisant appel à un transfert de matière entre phase implique obligatoirement un transfert de chaleur, à cause de la différence de propriétés thermodynamique de chaque phase.

Parfois, ce transfert de chaleur est moindre et il ne joue pas un rôle important pour la conduite du procédé : extraction liquide-liquide, absorption gaz liquide, décantation, filtration. C'est le transfert de matière qui est limitant.

Parfois, c'est le transfert de chaleur qui est limitant et le transfert de matière est transparent : ébullition, condensation.

Enfin dans le cas général les transferts sont simultanés et limitants, c'est le cas des opérations de distillation, d'humidification, de séchage. Nous nous limitons ici au cas de l'eau (**soluté**) dans l'air (**solvant**), mais cette approche est généralisable à n'importe quels autres composés.

Les procédés d'humidification et de séchage ont donc toutes les caractéristiques d'un échange de matière et de chaleur simultanés

Définitions

L'air est considéré comme immiscible dans l'eau liquide, ce qui permet de considérer uniquement les transferts d'eau (appelé vapeur) et de chaleur dans l'air (appelé gaz).

-Solubilité de l'eau dans l'air à 20°C et 1atm : $2,6 \cdot 10^{-2}$ en fraction molaire.

-Solubilité de l'air dans l'eau à 20°C et 1atm : $1,5 \cdot 10^{-5}$ en fraction molaire.

Equilibre eau liquide / vapeur

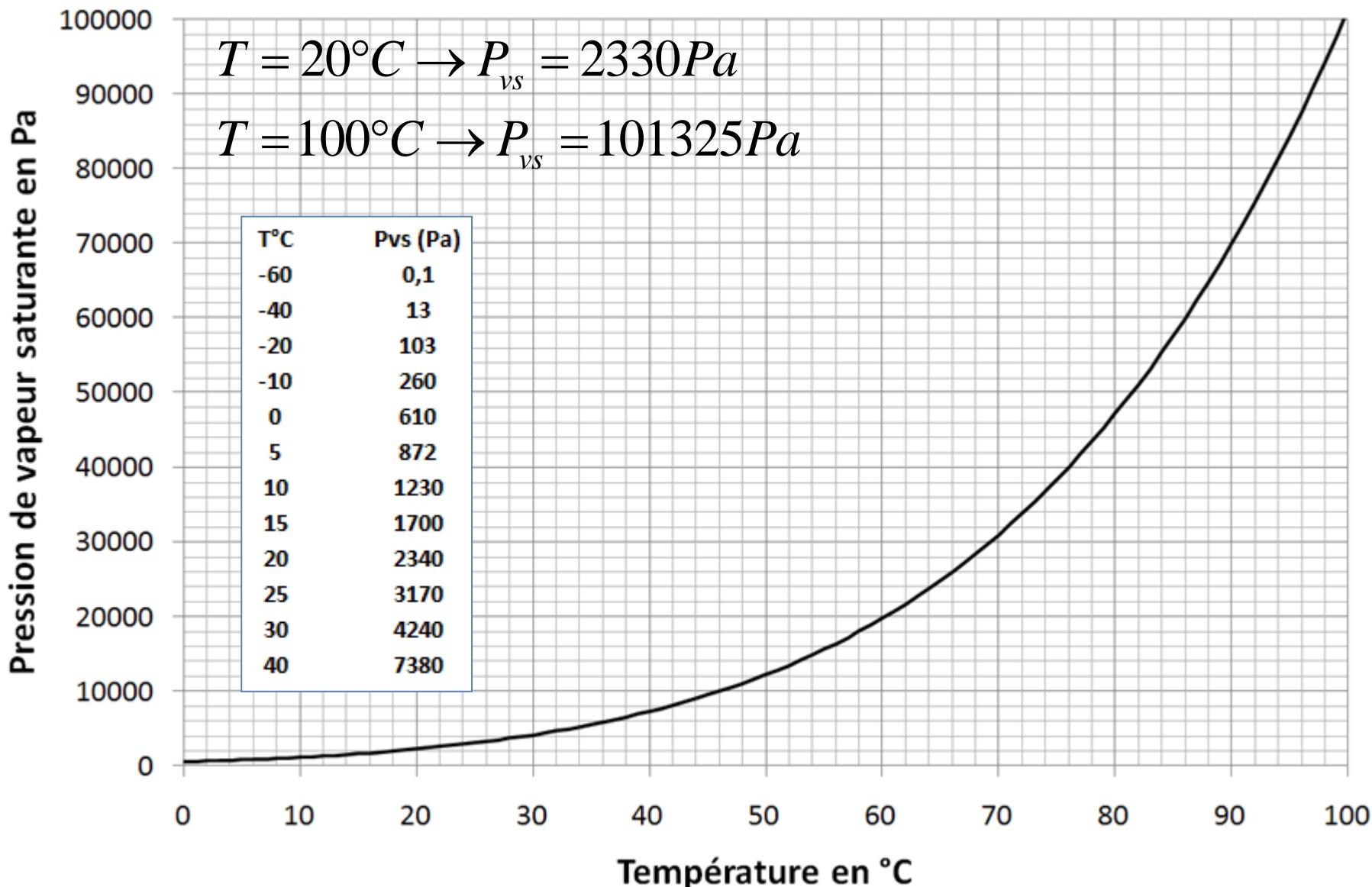
Formule de Duperray : $P_{vs} = \left(\frac{T}{100} \right)^4$ T en °C et P_{vs} en atm
[90°C - 300°C]

Formule d'Antoine : $\log_{10}(P_{vs}) = 10.23 - \frac{1750}{T + 235}$ P_{vs} en Pa et T en °C
[11°C - 68°C]

Formule de Rankine : $\ln P_{vs} = 13.7 - \frac{5120}{T}$ T en °K et P_{vs} en atm
[5°C - 140°C]

Cet équilibre sera vrai même vis-à-vis d'un mélange de gaz, la P_{vs} étant ainsi la pression partielle de vapeur d'eau à l'équilibre dans le mélange.

Pression de vapeur saturante de l'eau – Equation d'Antoine



Définitions

Lorsqu'une nappe d'eau est laissée à l'abandon, l'air en vis-à-vis de cette nappe se charge en eau jusqu'à ce que sa pression partielle P_{H_2O} atteigne P_{vs} . Lors de la phase d'équilibrage, un flux d'eau proportionnel à l'écart de concentration en eau entre l'air et l'interface à l'équilibre thermo s'établit. Ceci amène à définir les concentrations suivantes :

On appelle **Humidité Absolue** notée ω ou Y (en séchage) le rapport massique entre eau et air dans la phase gaz : c'est par définition un **rapport massique**.

$$\omega = \frac{m_{eau}}{m_{air \ sec}} \text{ en } kg_{eau} / kg_{air \ sec}$$

On peut montrer que pour un mélange eau/air :

$$\omega = 0.622 \frac{P_{H_2O}}{P_{tot} - P_{H_2O}}$$

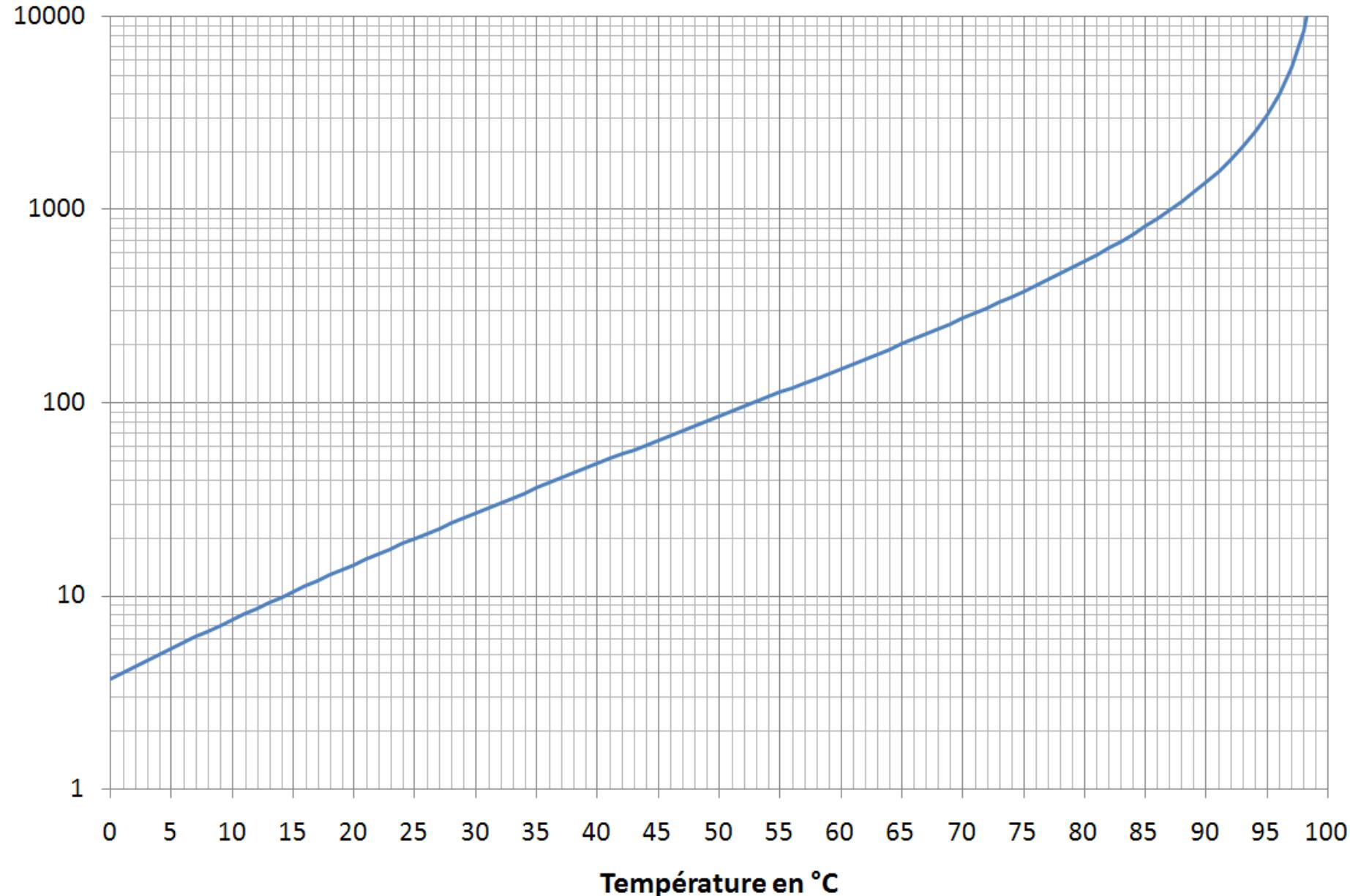
On appelle **Humidité Relative** notée ε le rapport entre P_{vs} et P_{H_2O} à une température donnée :

$$\varepsilon = \frac{P_{H_2O}}{P_{vs}} = \frac{\omega}{\omega_s} \text{ en \%}$$

Humidité absolue à saturation

Rapport massique eau/air à saturation ($\varepsilon=100\%$)

Grammes d'eau par kg d'air sec à saturation



Enthalpie d'un gaz humide

Tout comme l'humidité absolue, l'enthalpie d'un gaz humide est par convention ramenée à 1 kg d'air sec. Cela simplifie considérablement les calculs comme nous le verrons par la suite.

$$H_G = H_{\text{air sec}} + \omega H_{\text{vapeur}} \quad \text{Pour 1 kg de gaz sec et } \omega \text{ kg de vapeur (kJ ou kcal/kg air sec)}$$

Comme : $H_{\text{gaz sec}} = C_{p \text{ air}} (T_G - T_{ref})$

$$H_{\text{vapeur}} = C_{p \text{ vapeur}} (T_G - T_{ref}) + \Delta H_{vap T_{ref}}$$

Il vient : $H_{\text{gaz humide}} = (C_{p \text{ air}} + \omega C_{p \text{ vapeur}}) (T_G - T_{ref}) + \omega \Delta H_{vap T_{ref}}$

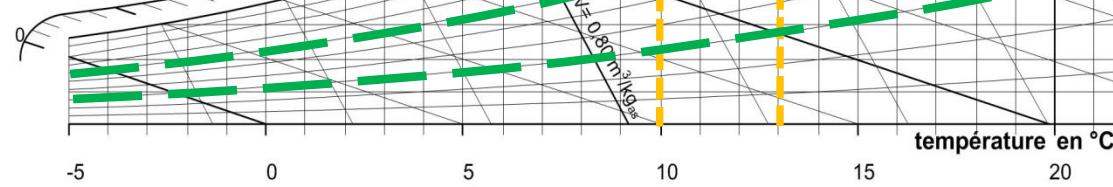
T_{ref} pouvant être pris à 0°C par convention, on peut exprimer l'enthalpie du mélange par :

$$H_G = (1,003 + \omega \cdot 1,964) T + \omega \cdot 2487 \text{ en kJ/kg air sec}$$

L'ensemble des données enthalpie, humidités et températures sont regroupées pour l'eau sous forme d'abaques : ce sont les **diagrammes de l'air humide (Carrier ou Mollier Ramzine)**.

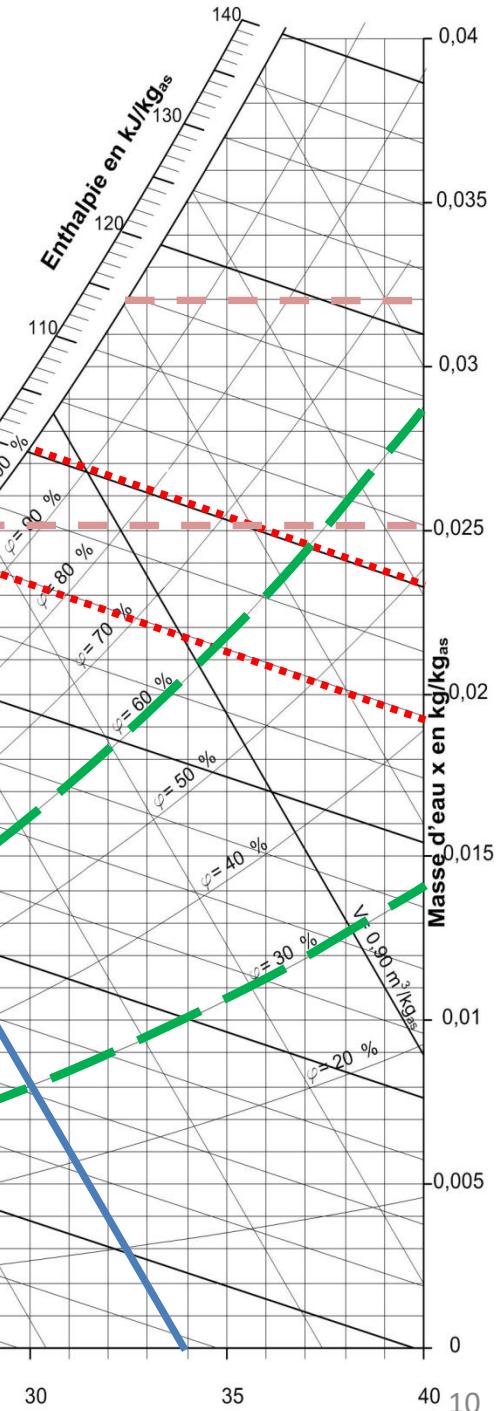
DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

- Iso volumes massiques
- Iso enthalpies
- Isothermes
- Iso humidités relative
- Iso humidités absolues



Courbe de saturation

température en °C



0,04

0,035

0,03

0,025

0,02

0,015

0,01

0,005

0

masse d'eau x en $\text{kg/kg}_{\text{gas}}$

DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Détermination de la température de rosée

$T_{\text{rosée}}$: température à partir de laquelle de la condensation est observable sur une surface froide plongée dans l'air.



GRENOBLE
INP Phelma
UGA

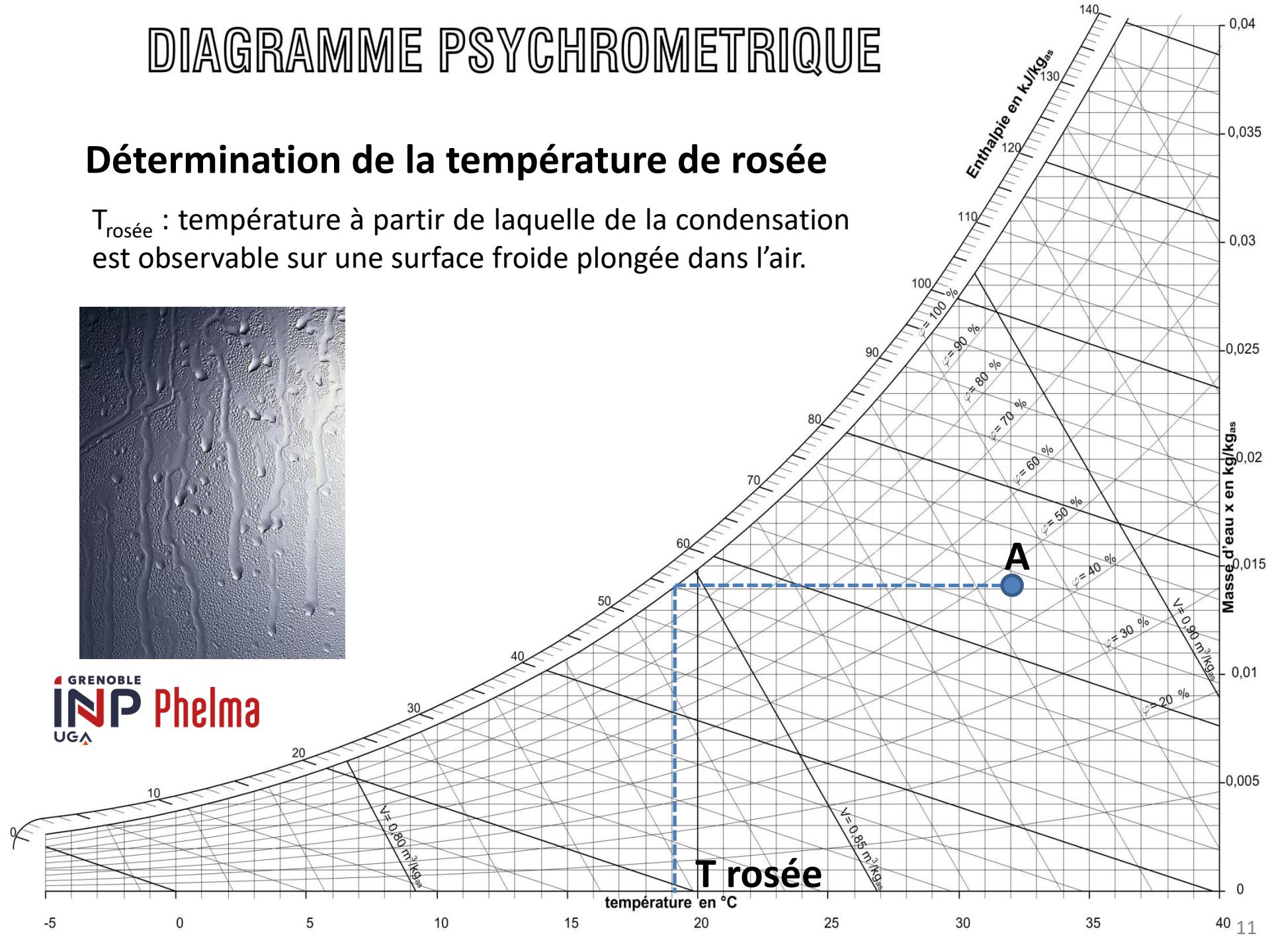


DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Détermination de l'humidité relative à partir de la température et de la température de rosée

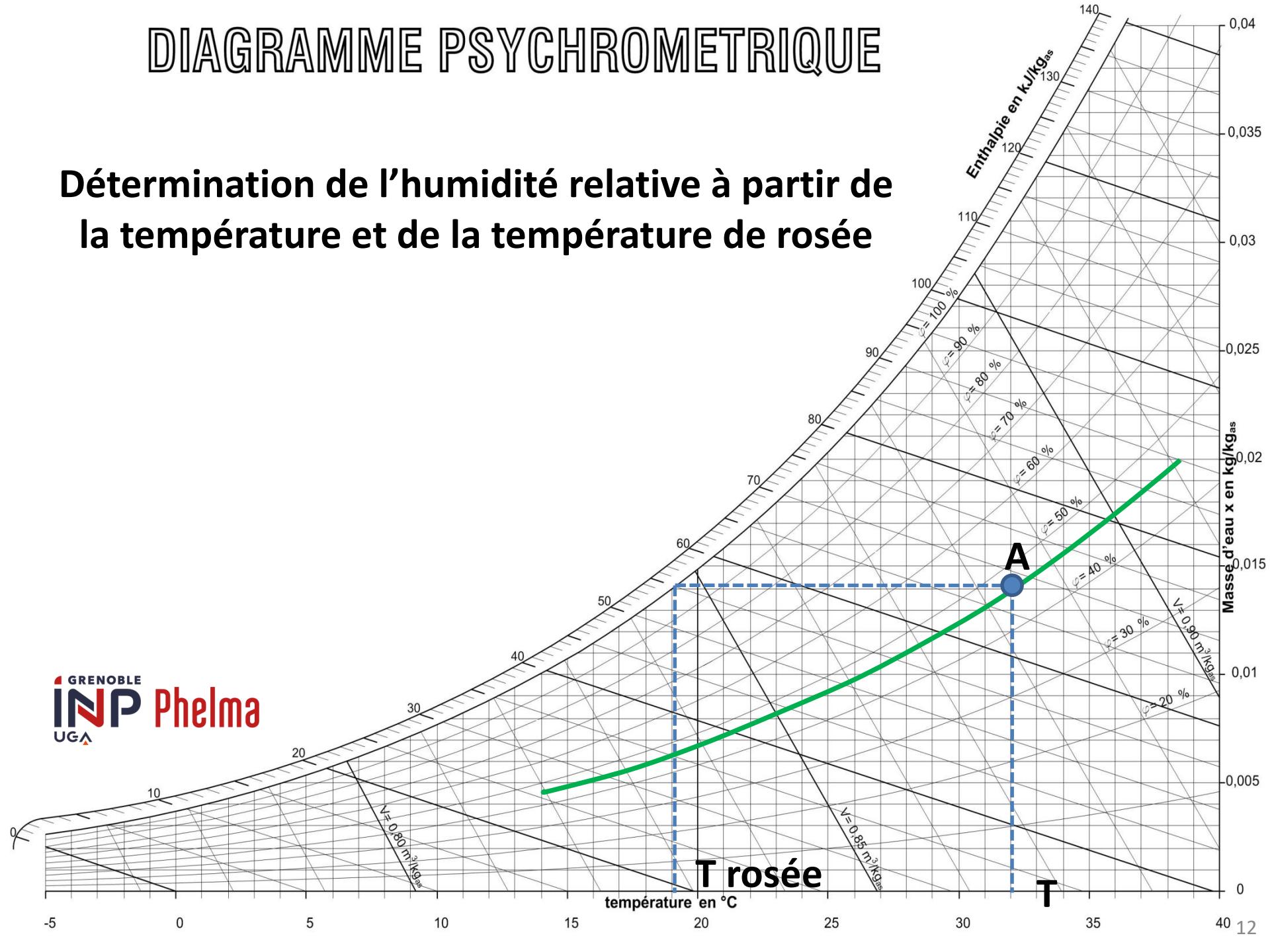


DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Mélange adiabatique de deux flux A et B

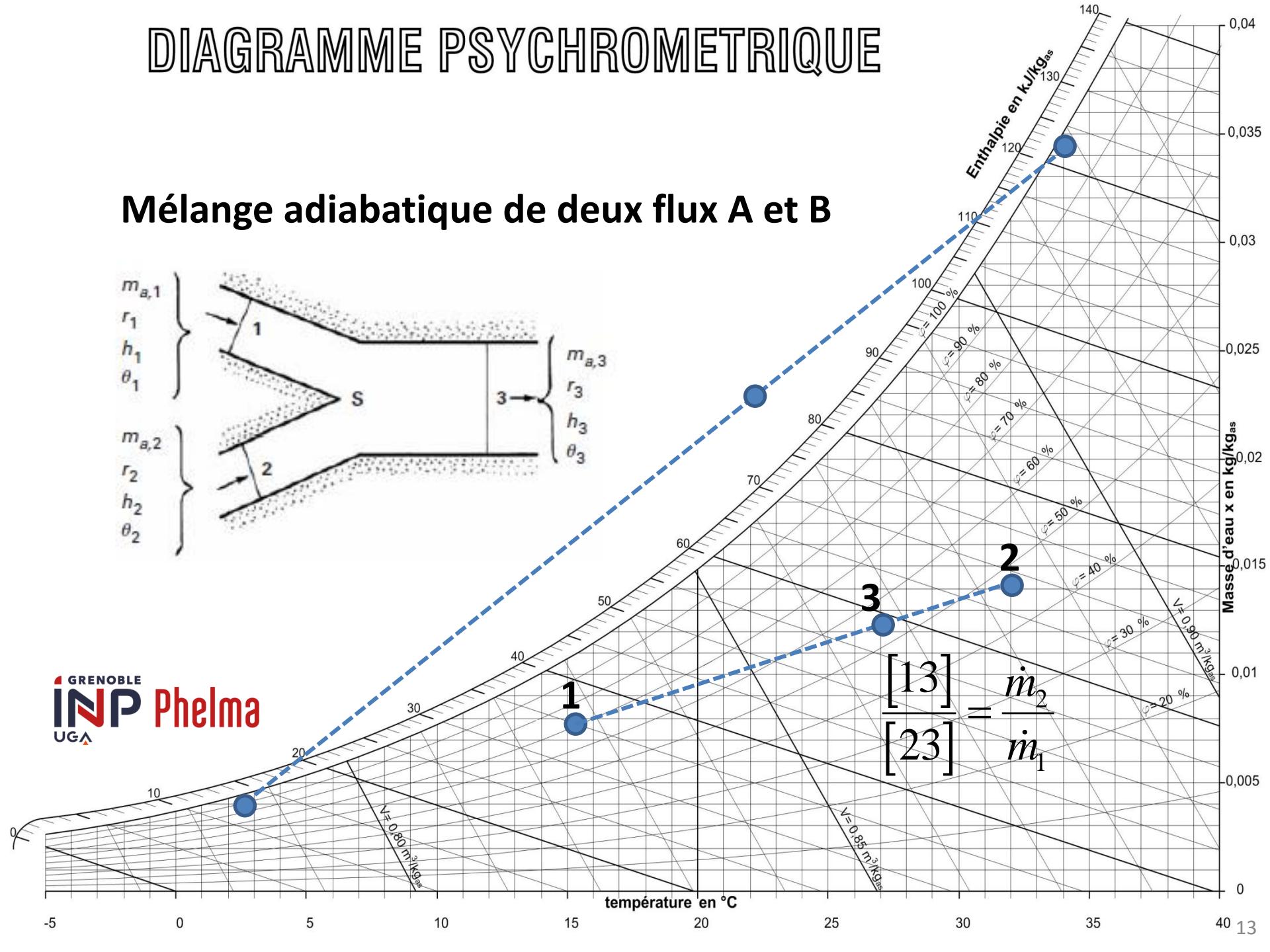
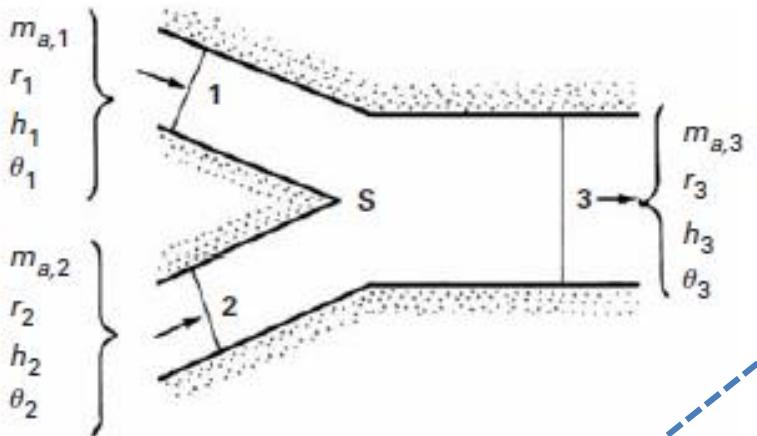


DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Mélange adiabatique de deux flux A et B

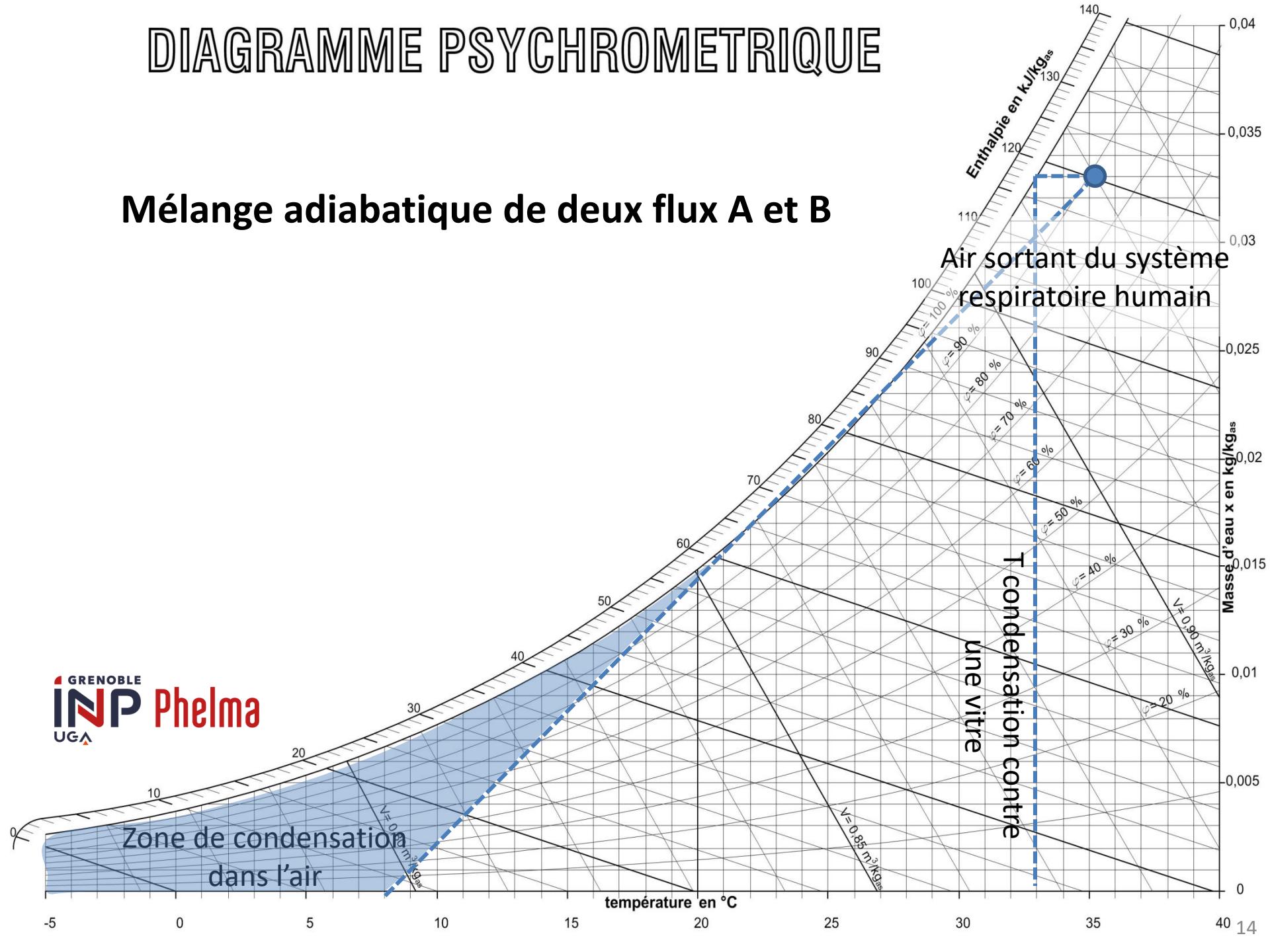


DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Echauffement à pression constante

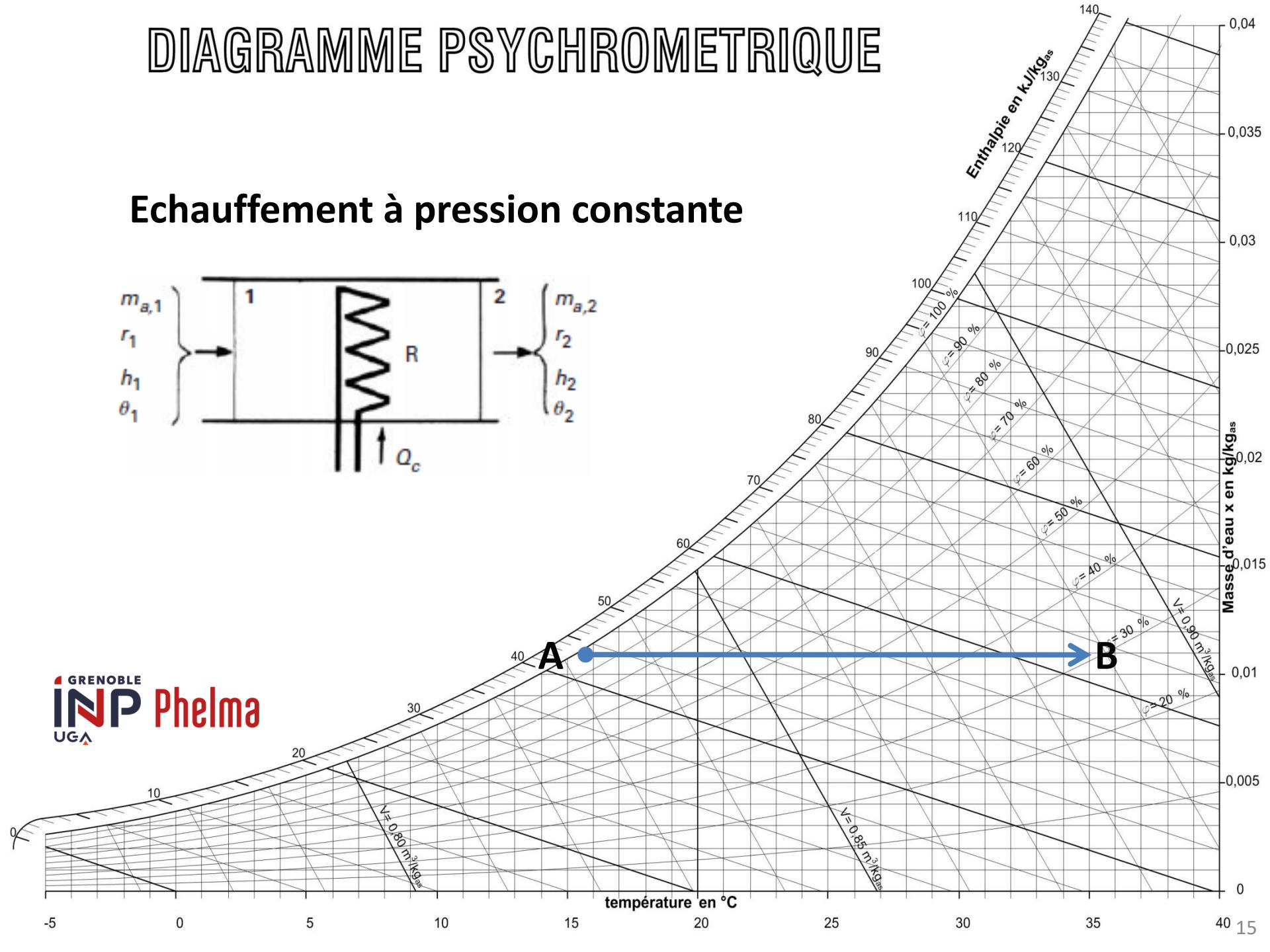
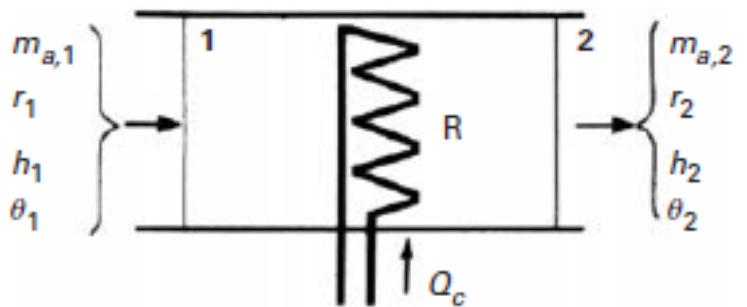
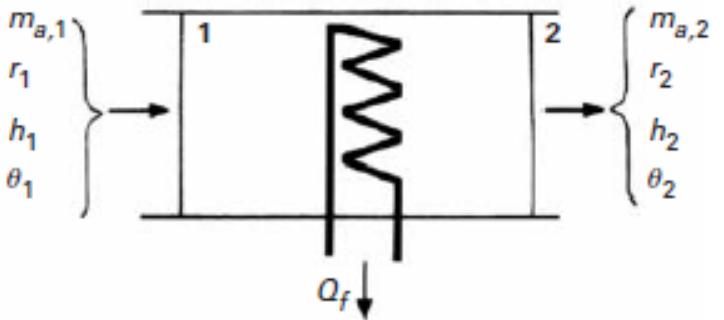


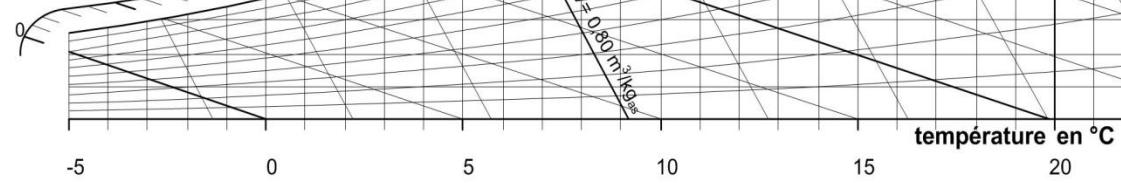
DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Refroidissement à pression constante



Condensation

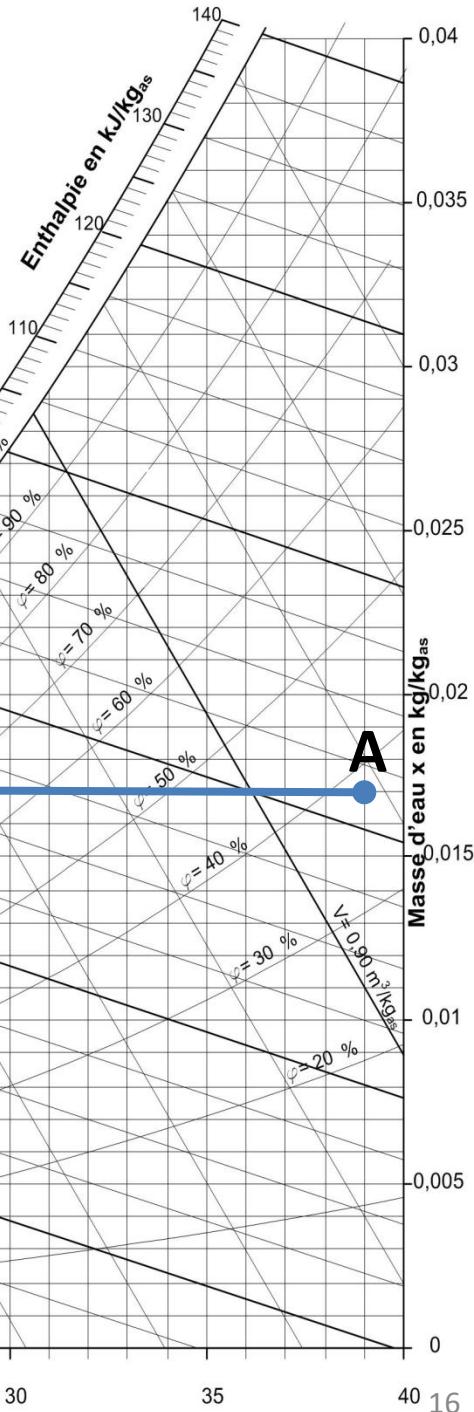
B



température en °C

0 5 10 15 20 25 30 35 40

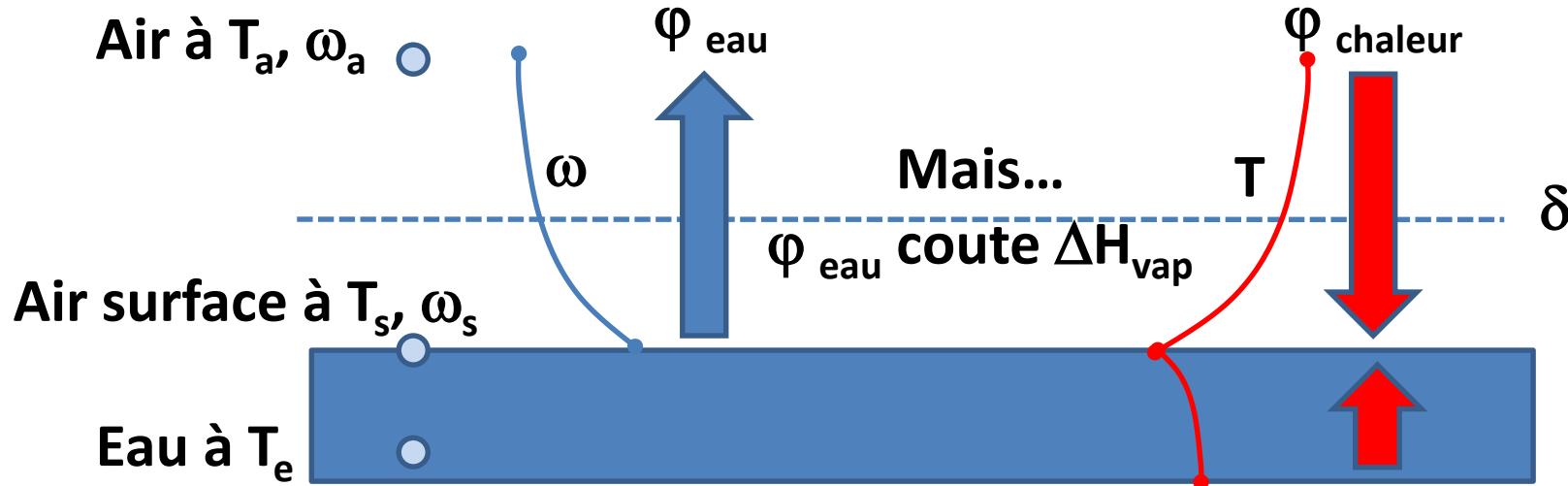
16



16

Principe de l'humidification

Que se passe-t-il lorsqu'une masse d'eau est abandonnée à l'air libre ?



Ici, le flux de matière (eau) est nécessairement accompagné d'un flux de chaleur dirigé en sens inverse. L'évaporation de l'eau due au gradient de concentration nécessite un flux de chaleur provenant de l'eau et de l'air, ceux-ci se refroidissent.

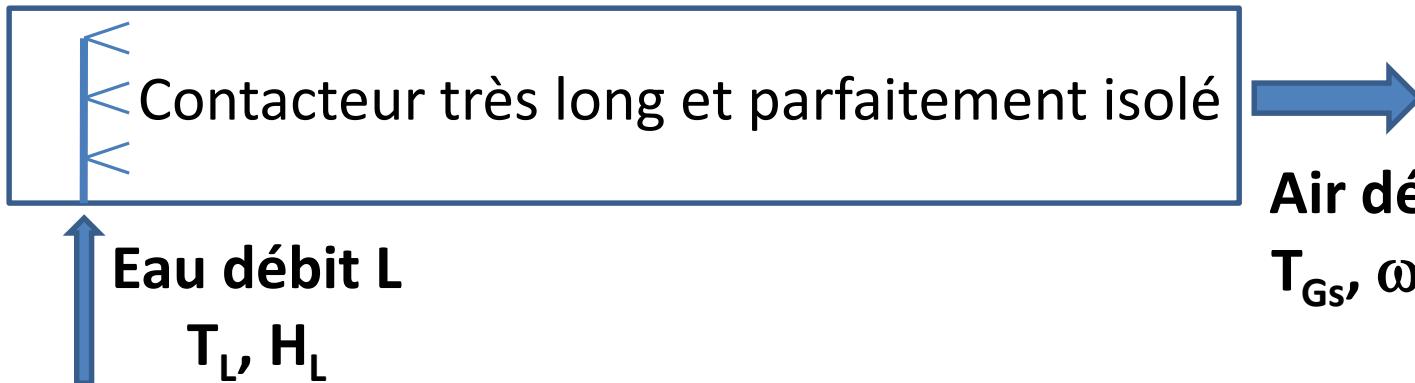
$$\varphi_{chaleur} = \varphi_{eau} \Delta H_{vap(T_H)}$$

Une seule chose est connue : la concentration de l'air à la surface de l'eau est à saturation (équilibre thermo). Quelle est la température minimale que peut atteindre le système ?

Humidification adiabatique circuit ouvert

Air débit G

T_{Ge}, ω_e, H_{Ge}



On injecte la quantité d'eau **juste suffisante** pour que le gaz soit **humidifié jusqu'à saturation**. On considère également que **l'opération est adiabatique** : il n'y a pas de transfert de chaleur à travers les parois du contacteur.

$$\text{Bilan sur l'eau : } L + G\omega_e = G\omega_s \text{ soit } L = G(\omega_s - \omega_e)$$

$$\text{Bilan enthalpique : } LH_L + GH_{Ge} = GH_{Gs}$$

Soit sur tout ou partie
de l'installation:

$$\frac{H_{Gs} - H_{Ge}}{\omega_s - \omega_e} = \frac{H_G - H_{Ge}}{\omega - \omega_e} = H_L$$

Résultat tout
sauf intuitif..

DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Etat de départ pour L	Enthalpie HL (kJ.kg ⁻¹)
Glace à 0°C	-334
Liquide à 0°C	0
Vapeur saturante à 0°C	2487
Liquide à 100°C	418
Vapeur saturante à 100°C	2675
Vapeur surchauffée à 300°C	3093

Pente suivant la nature
de l'eau injectée

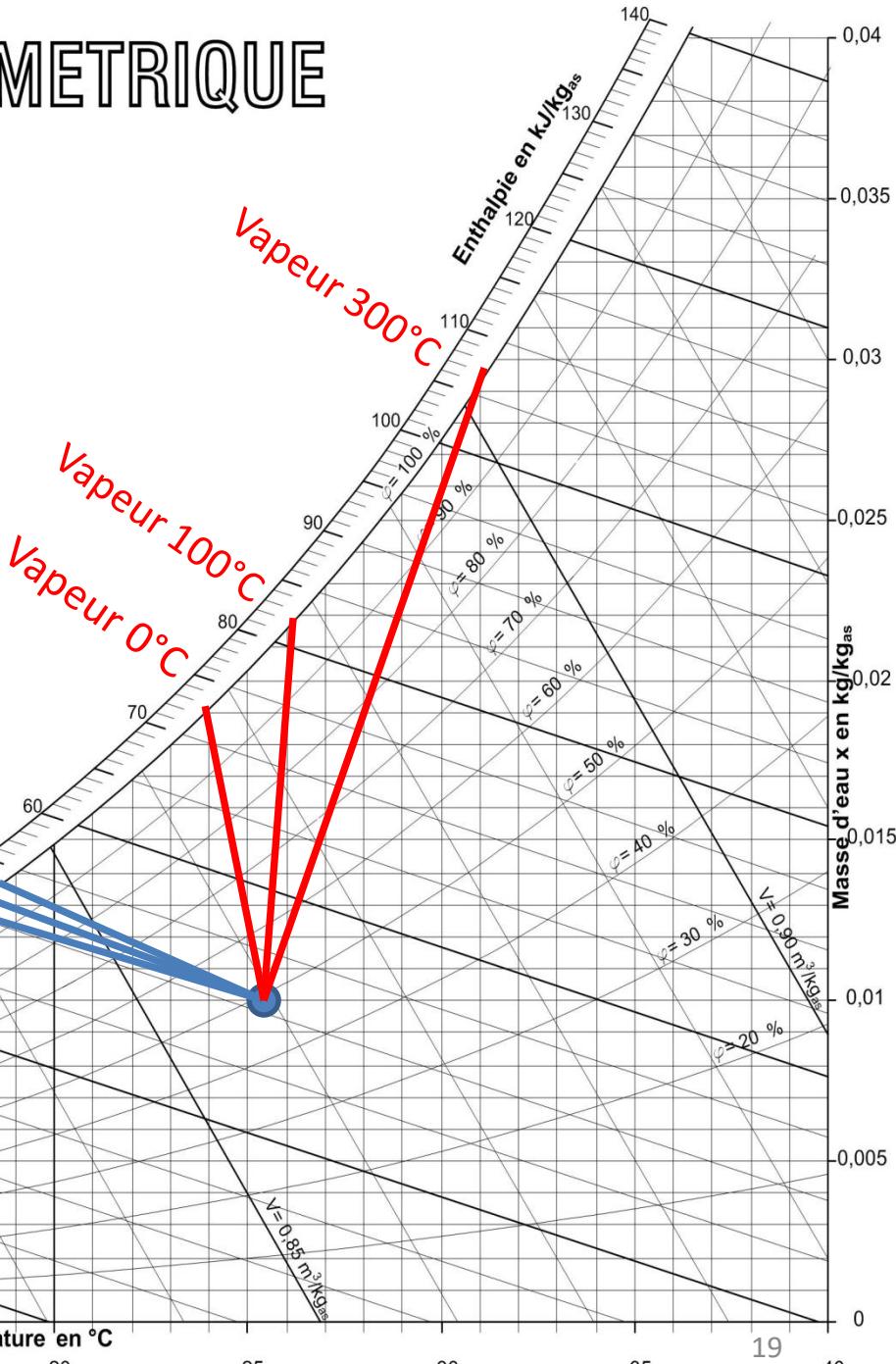
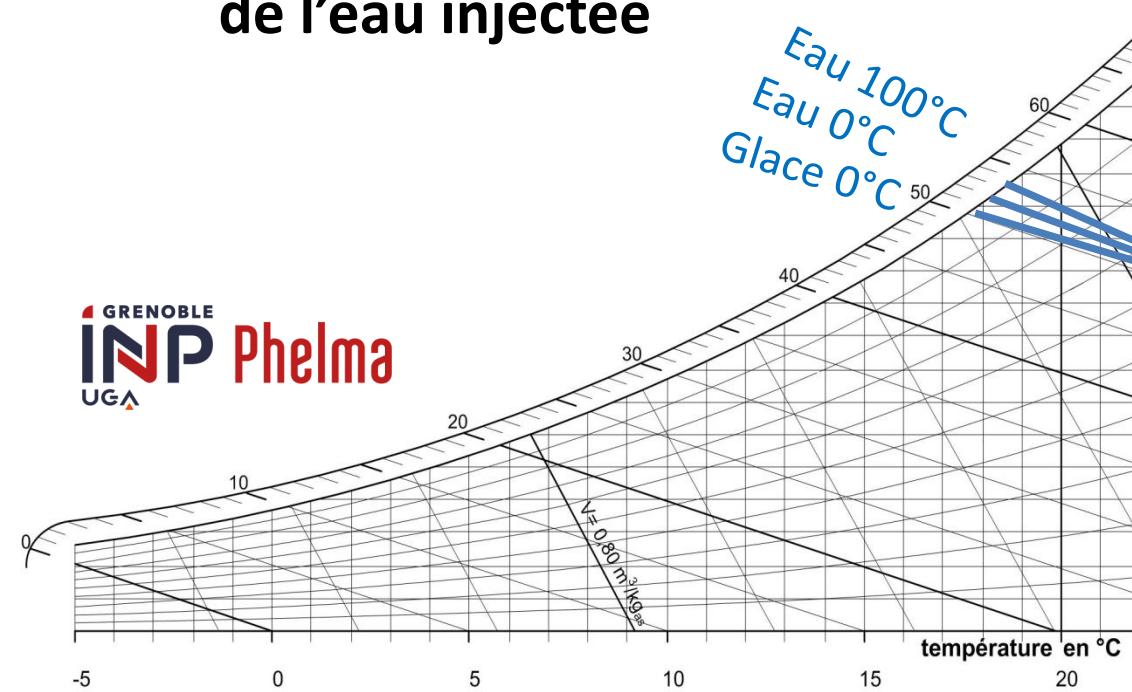
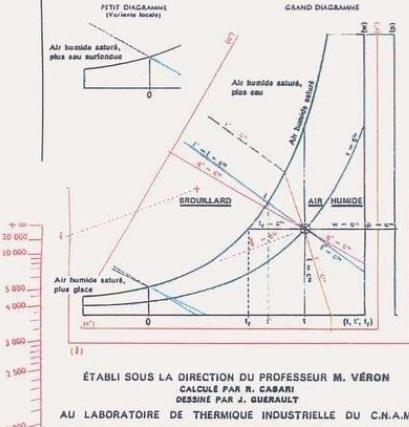


DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

ENTHALPIE — HUMIDITÉ ABSOLUE

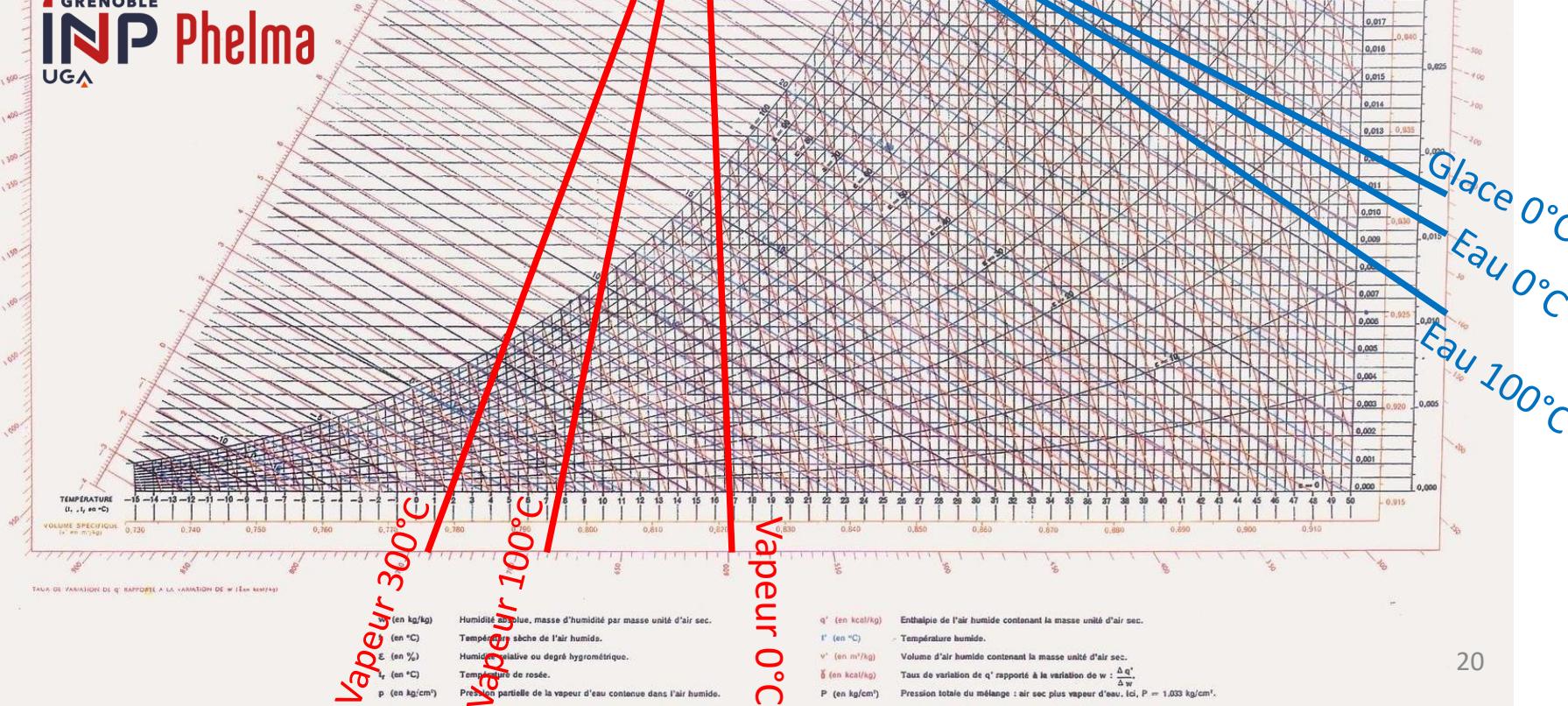
Construit en coordonnées obliques, lui restituant la disposition habituelle du diagramme de Carrier (température-humidité absolue).

Pression barométrique normale $P = 1,013 \text{ kg/cm}^2 = 1013 \text{ mb} = 760 \text{ mm Hg}$



3 600

GRENoble
INP Phelma
UGA



Humidification adiabatique circuit ouvert

Plaçons nous dans le cas particulier d'une injection d'eau liquide. On peut calculer sans diagramme l'ordre de grandeur de la différence de température du gaz entre l'entrée et la sortie du contacteur, en faisant l'hypothèse que la variation de température de l'eau est faible ($T_L \approx T_{Gs}$) :

$$H_{Gs} - H_{Ge} = H_L (\omega_s - \omega_e) \quad \text{Issu des slides précédents}$$

$$H_L = C_{p \text{ liquide}} (T_L - T_{ref}) \quad \text{Enthalpie du liquide}$$

$$H_G = (C_{p \text{ air}} + \omega C_{p \text{ vapeur}}) (T_G - T_{ref}) + \omega \Delta H_{vap \text{ } T_{ref}} \quad \text{Enthalpie du gaz}$$

Après un long réarrangement :

$$T_{Ge} - T_{Gs} = \frac{\Delta H_{vap(T_{Gs})}}{C_{p \text{ air}} + \omega_e C_{p \text{ eau}}} (\omega_s - \omega_e)$$

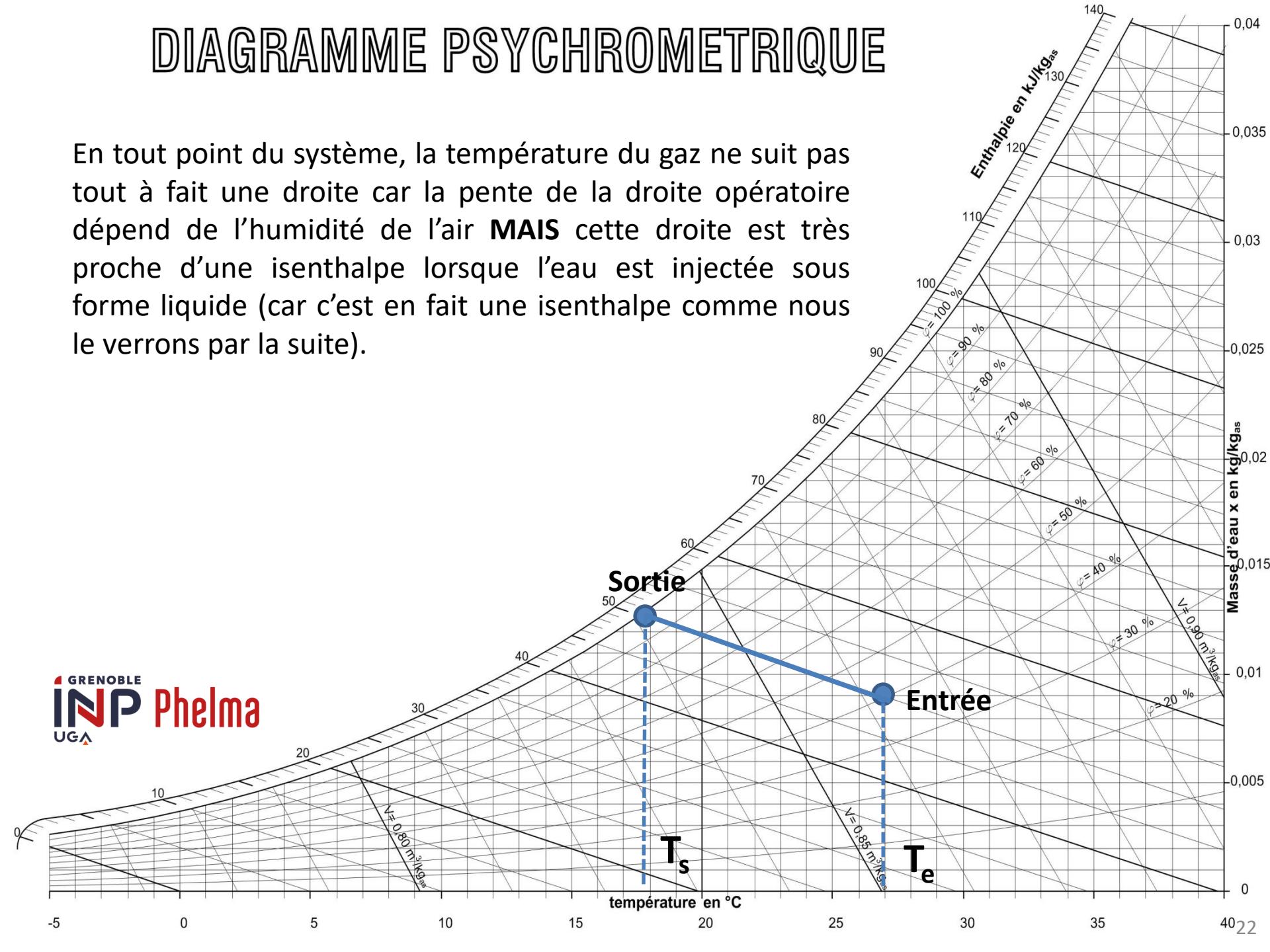
Valeur à priori inconnue...

En tous points :

$$T_{Ge} - T_G = \frac{\Delta H_{vap(T_{Gs})}}{C_{p \text{ air}} + \omega_e C_{p \text{ eau}}} (\omega - \omega_e)$$

DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

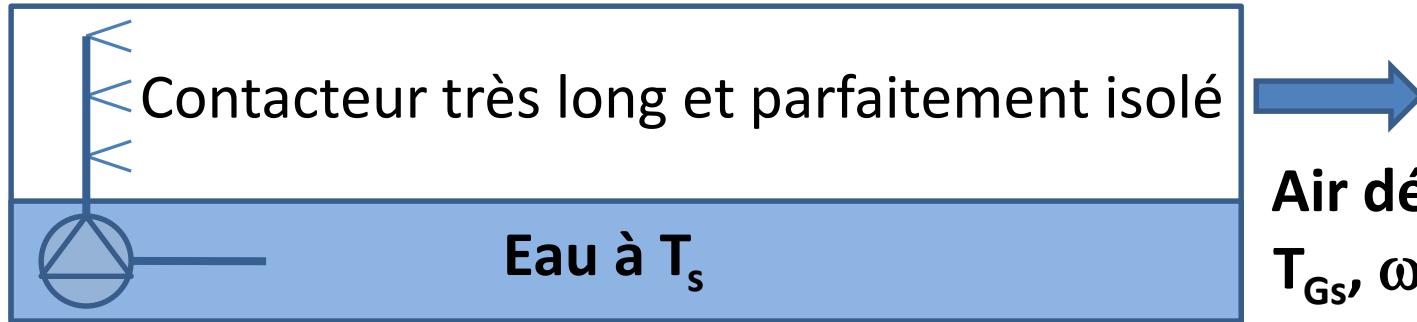
En tout point du système, la température du gaz ne suit pas tout à fait une droite car la pente de la droite opératoire dépend de l'humidité de l'air **MAIS** cette droite est très proche d'une isenthalpe lorsque l'eau est injectée sous forme liquide (car c'est en fait une isenthalpe comme nous le verrons par la suite).



Humidification adiabatique circuit fermé

Air débit G

T_{Ge}, ω_e, H_{Ge}



Eau débit externe $L = 0$

Considérons maintenant le cas d'un contacteur rempli d'une grande réserve d'eau mais toujours adiabatique. Il n'y a pas d'apport d'eau externe et le réacteur est adiabatique. L'eau est à sa température d'équilibre T_s .

Bilan enthalpique : $GH_{Ge} = GH_{Gs}$ soit $H_{Ge} = H_{Gs}$

L'enthalpie de l'air reste constante. Ceci est possible car le gain d'enthalpie dû à l'apport de vapeur d'eau ($HG = f(\omega)$) est compensé par une baisse de température du gaz : toute l'énergie absorbée par l'évaporation est fournie par le gaz qui se refroidit. L'eau et l'air ne peuvent s'équilibrer qu'à une température identique (flux de chaleur nul) appelée **température de saturation adiabatique T_s** et l'air à une **humidité relative de 100% notée ω_s** (flux de matière nul à la fin de l'échangeur).

Humidification adiabatique circuit fermé

Pour calculer l'ordre de grandeur de la température de sortie, posons que l'enthalpie nécessaire à l'évaporation du liquide est tout juste compensée par la baisse de température du gaz :

$$G(\omega_s - \omega_e) \Delta H_{vap(T_G)} = G C_{p\ air\ humide} (T_{Ge} - T_{Gs})$$

Soit le même résultat que l'échangeur précédent :

$$T_{Ge} - T_{Gs} = \frac{\Delta H_{vap(T_G)}}{C_{p\ air} + \omega_e C_{p\ eau}} (\omega_s - \omega_e)$$

$$\frac{dT_G}{d\omega} = -\frac{\Delta H_{vap(T_G)}}{C_{p\ air\ humide}}$$

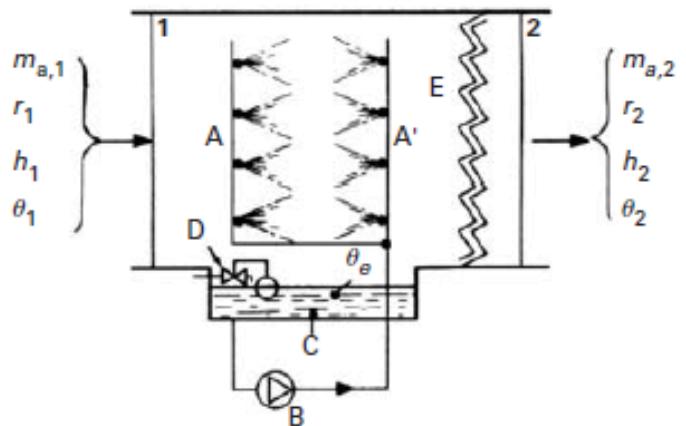
Cette courbe opératoire décrivant la température en tout point d'un échangeur infini est en fait quasiment confondue avec une isenthalpe.

On pourra maintenant déduire que toute opération d'échange menée avec de l'eau en circuit fermé sans apport de chaleur et de l'air en circuit ouvert suit une droite de pente $-\Delta H_{vap} / C_{p\ air\ humide}$, qui est de fait une isenthalpe.

DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Humidification adiabatique

T_s est appelée **température humide** ou **température de saturation adiabatique**



A, A' rampes de pulvérisation
B pompe de recirculation
C bac à eau

D robinet d'eau d'appoint
E filtre d'arrêt des gouttelettes

Sortie

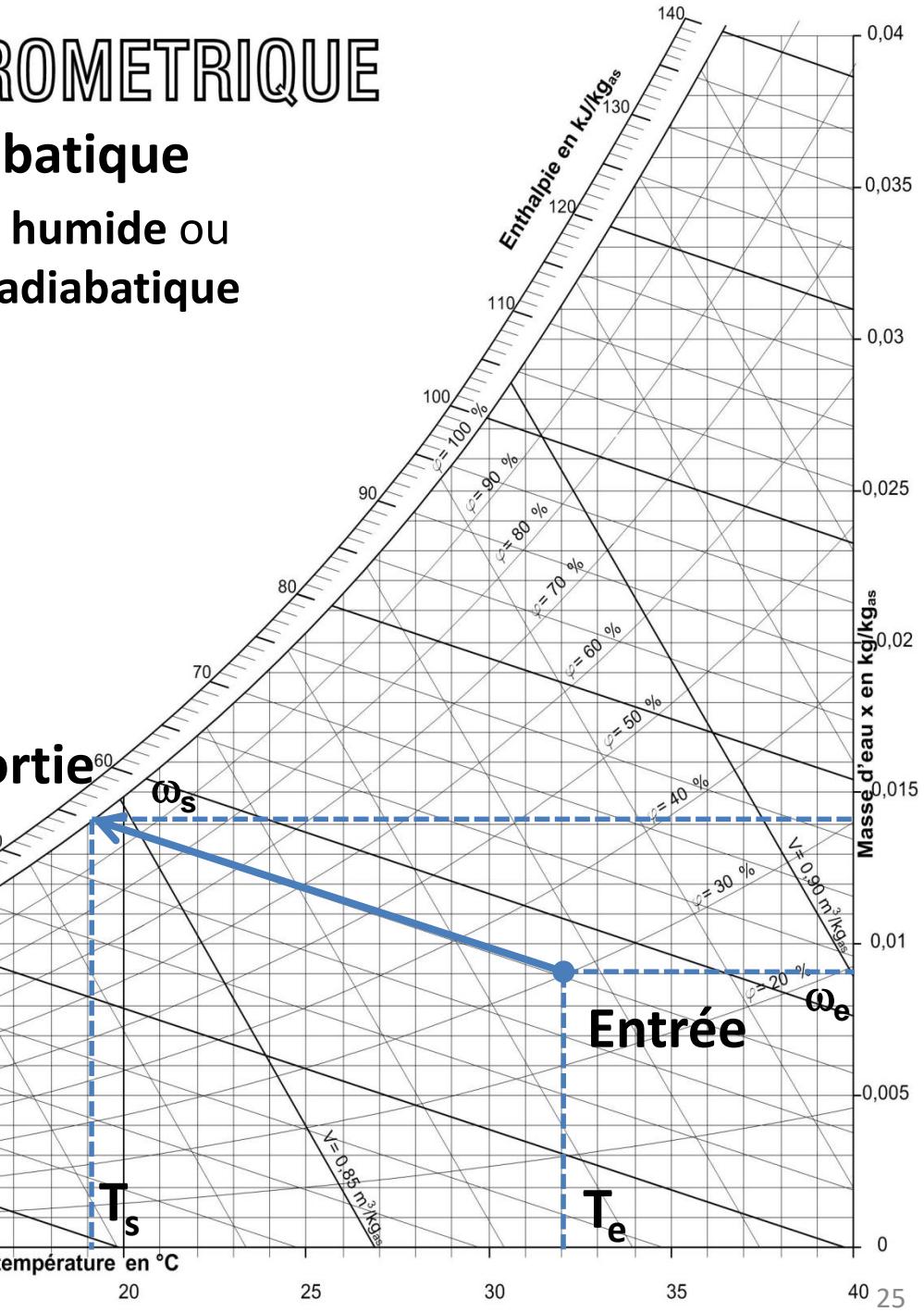
ω_s

température en °C

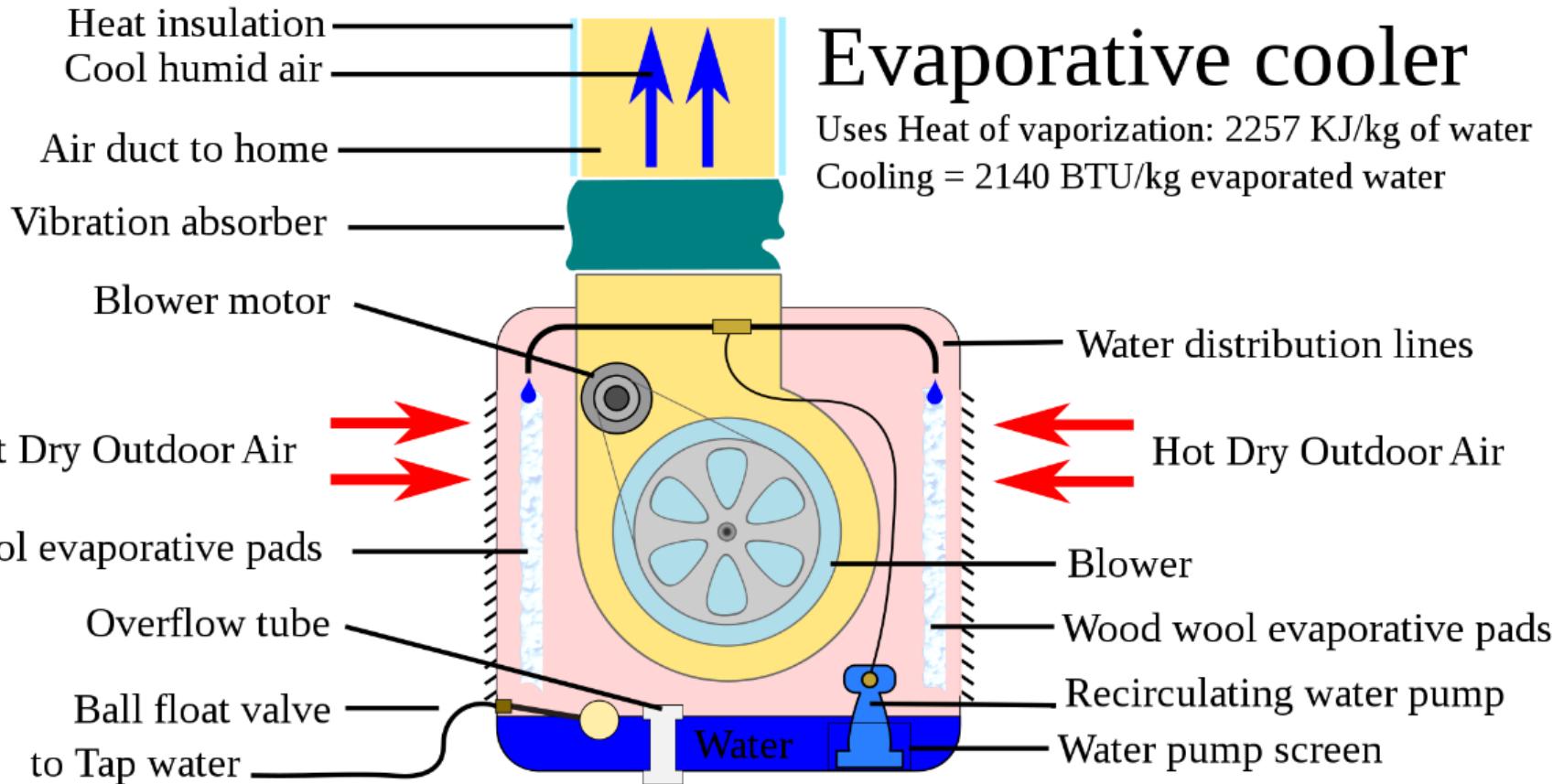
T_s

Entrée

T_e



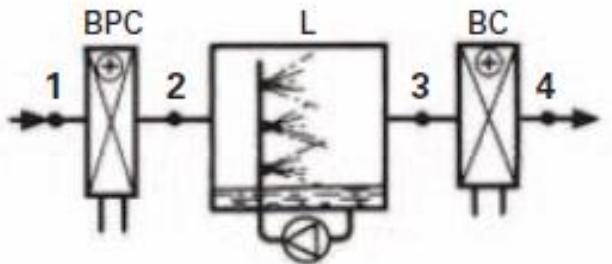
Climatisation par évaporation



La diminution de température est d'autant plus prononcée que l'air est sec en entrée d'évaporateur : inutile sous climat tropical. L'échangeur n'est généralement pas assez efficace pour aller jusqu'à la courbe de saturation.

DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

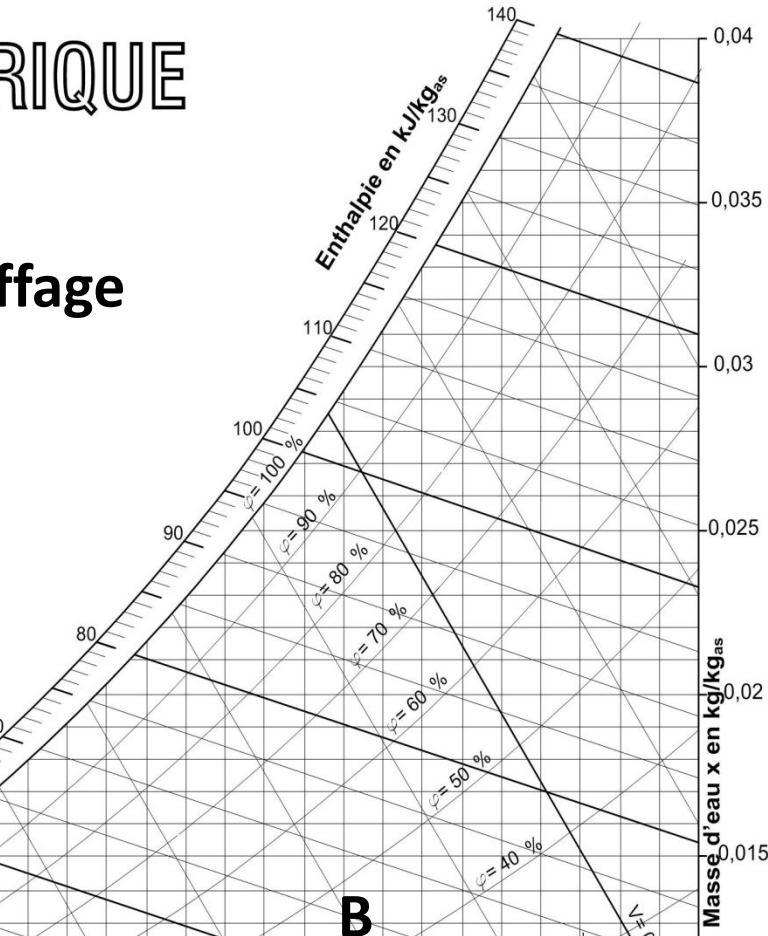
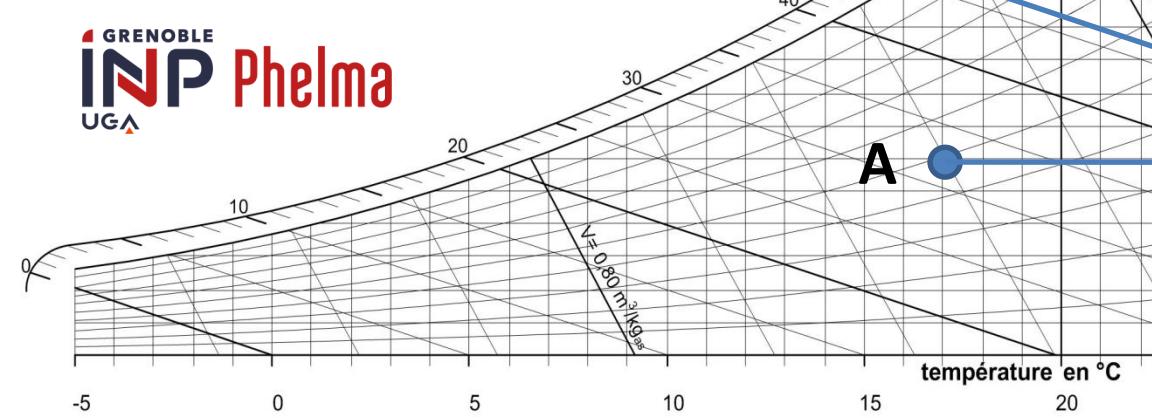
humidification adiabatique et réchauffage



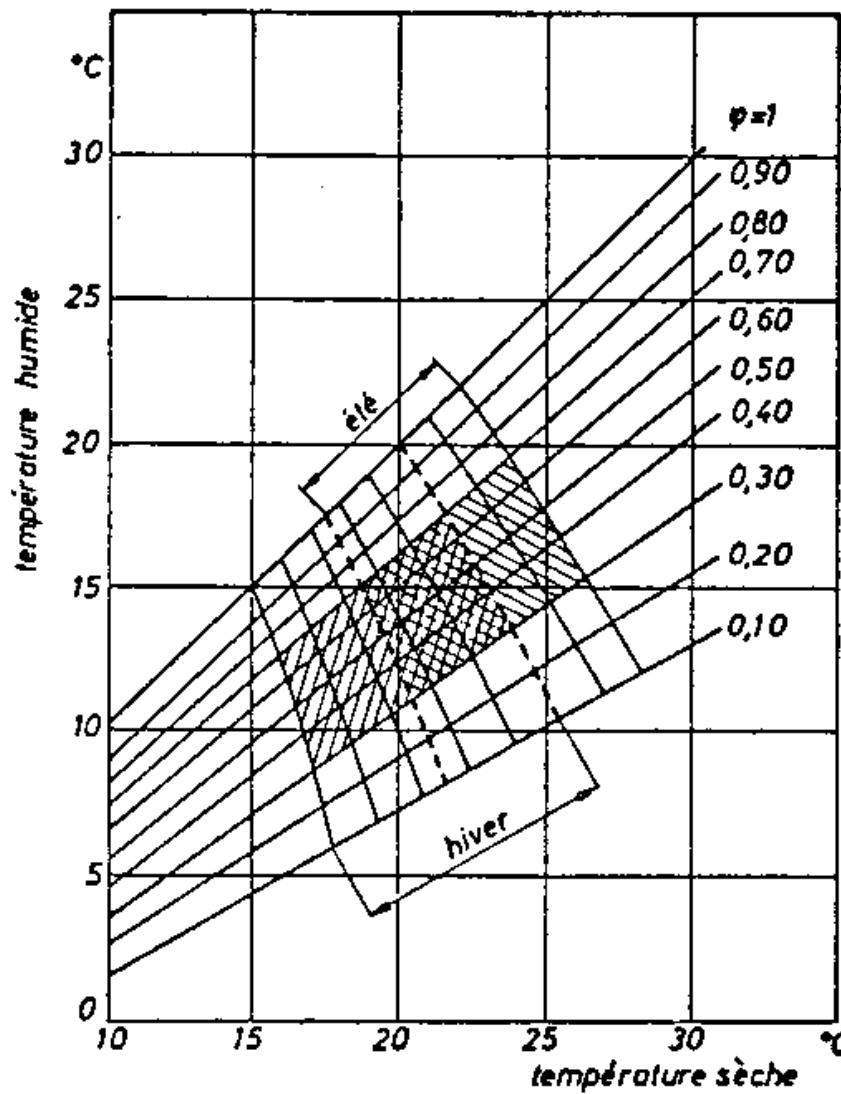
a schéma du dispositif technique

GRENOBLE
INP
UGA

Phelma



Zone de confort humain dans les locaux



Zone de survivabilité dans les locaux (très) confinés

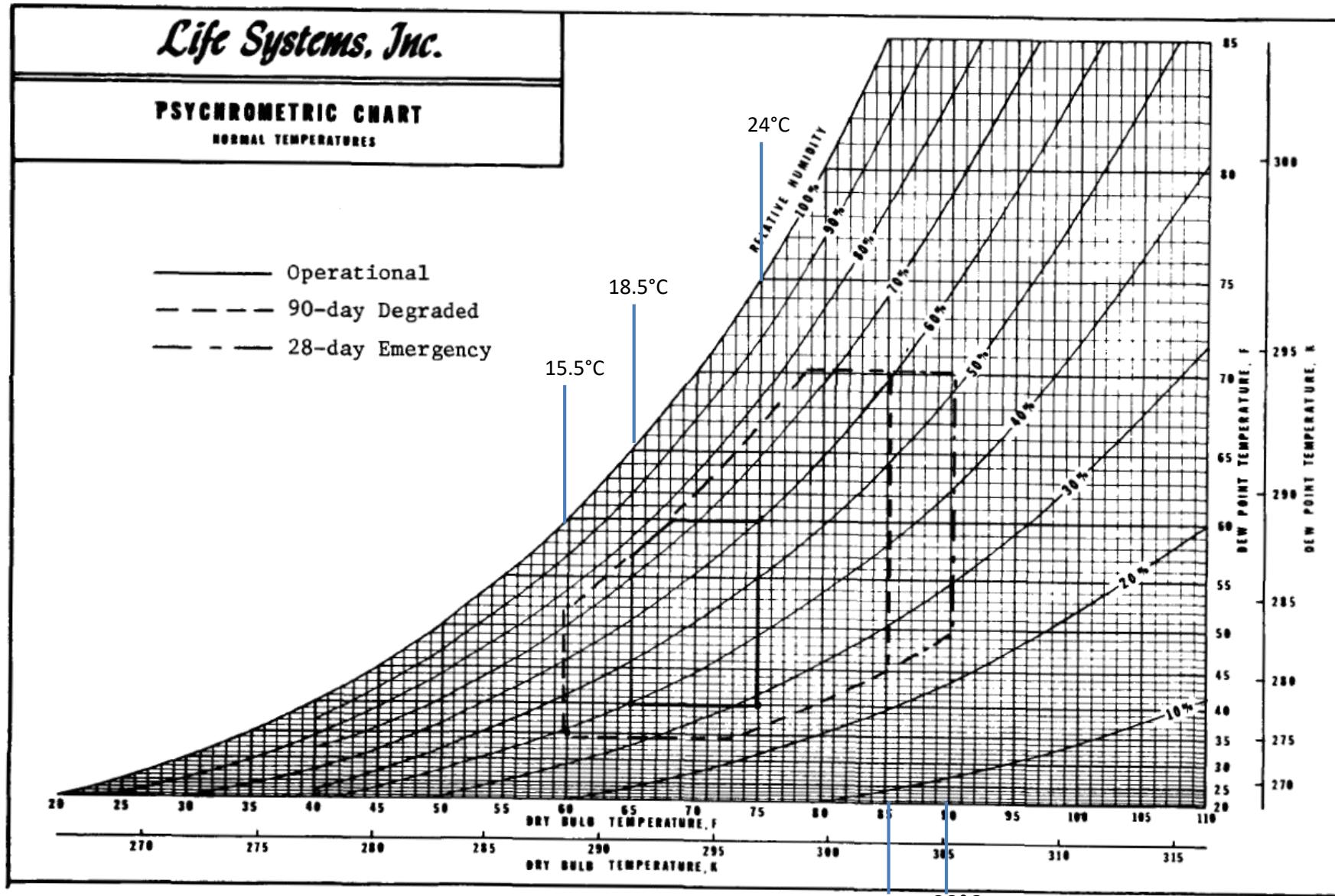
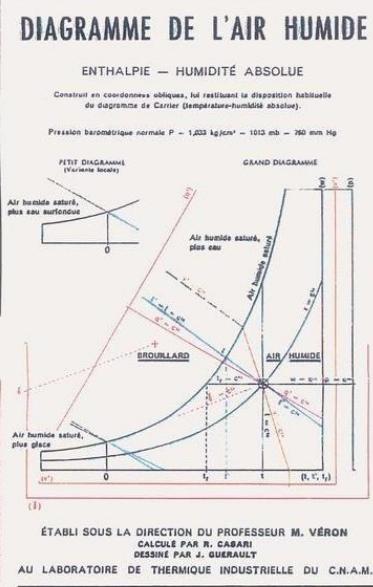
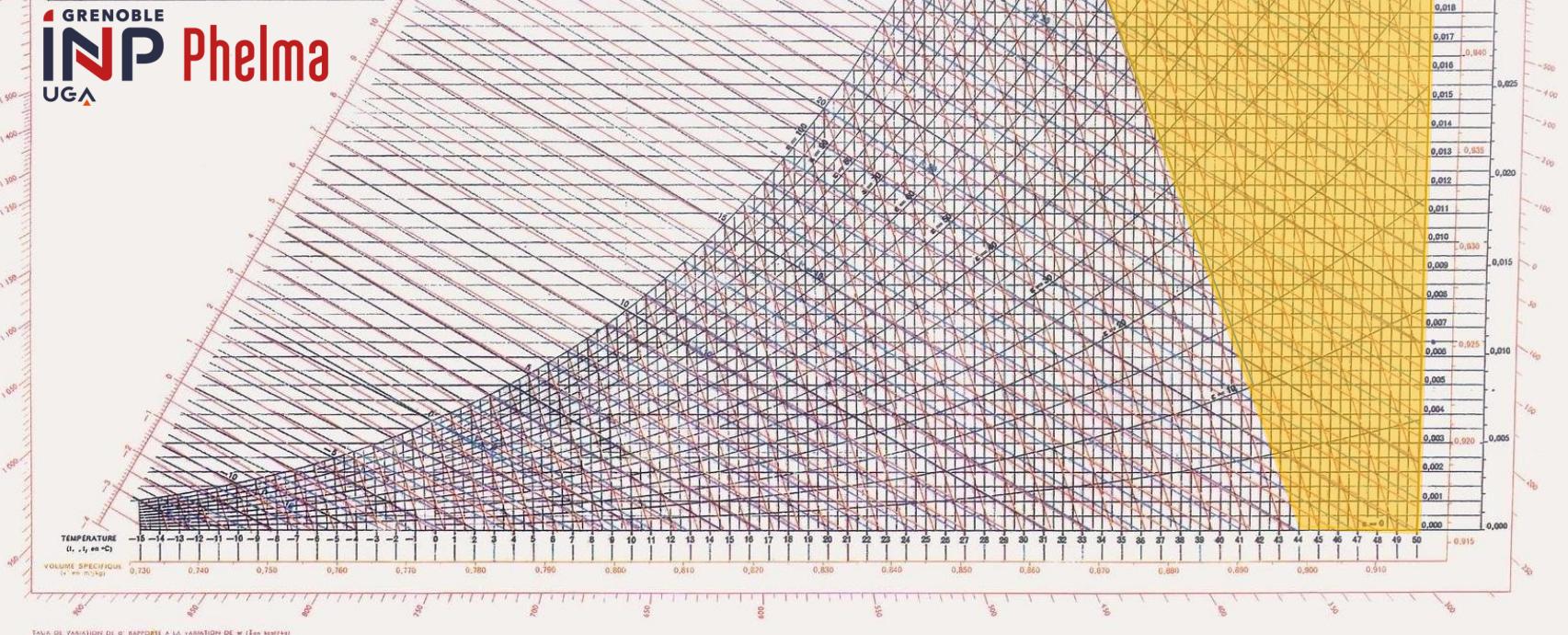


FIGURE 15 SPACE STATION ATMOSPHERE HUMIDITY SPECIFICATION RANGES



GRENoble
INP Phelma
UGA



w (en kg/kg) Humidité absolue, masse d'humidité par masse unité d'air sec.
 t (en °C) Température sèche de l'air humide.
 E (en %) Humidité relative ou degré hygrométrique.
 t_r (en °C) Température de rosée.
 p (en kg/cm²) Pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide.

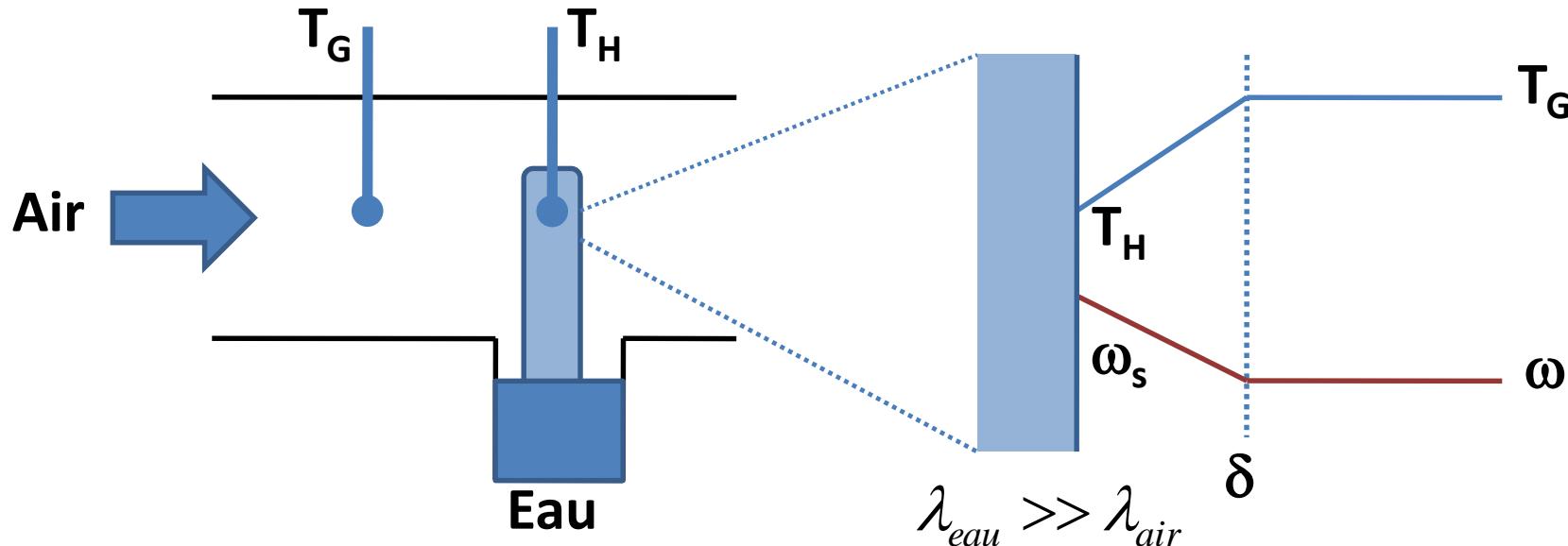
q' (en kcal/kg) Enthalpie de l'air humide contenant la masse unité d'air sec.
 t' (en °C) Température humide.
 \bar{v}' (en m^3/kg) Volume d'air humide contenant la masse unité d'air sec.
 δ (en kcal/kg) Taux de variation de q' rapporté à la variation de w : $\frac{\Delta q'}{\Delta w}$.
 P (en kg/cm^2) Pression totale du mélange : air sec plus vapeur d'eau. Ici, $P = 1,033 \text{ kg/cm}^2$.

Mine de Naica au Mexique



48°C et 100% humidité : durée de survie sans scaphandre : 14 minutes

Température de thermomètre humide



On plonge deux thermomètres identiques dans un flux d'air : un plonge directement dans le flux, l'autre est entouré d'une mèche hydrophile qui plonge dans une réserve d'eau. La température du deuxième thermomètre va s'équilibrer à une température dite « température humide ».

$$\text{En régime stationnaire : } \varphi_{eau} = k_{eau}(\omega_s - \omega)S$$

$$\varphi_{chaleur} = h(T_G - T_H)S$$

$$\varphi_{chaleur} = \varphi_{eau} \Delta H_{vap}(T_H)$$

En réorganisant :

$$T_G - T_H = \frac{\Delta H_{vap(T_H)}}{h/k_{eau}} (\omega_s - \omega)$$

Pour des vitesses de gaz suffisantes (2-3 m/s), le rapport h/k_{eau} reste à peu près constant, en effet autour d'un cylindre :

$$\frac{h}{k_{eau}} = \frac{Nu \cdot \lambda}{Sh \cdot D_{H_2O-Air}} = \frac{\lambda \cdot A \cdot Re^m \cdot Pr^{0.31}}{D_{H_2O-Air} \cdot A \cdot Re^m \cdot Sc^{0.31}} = \frac{0.026}{2.92 \cdot 10^{-5}} \cdot \left(\frac{0.71}{0.57} \right)^{0.31}$$

$$\frac{h}{k_{eau}} = \frac{0.026}{2.92 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{0.71}{0.57} \right)^{0.31} \approx 950 \text{ J.m}^{-3}\text{K}^{-1}$$

$$C_{p\ air\ humide} = C_{p\ air} + \omega C_{p\ eau} \approx 1040 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \approx 945 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

Donc fortuitement : $\frac{h}{k_{eau} C_{p\ air\ humide}} \approx 1$

Ce rapport est appelé critère de Lewis ou « coefficient psychrométrique de l'air humide »

Nous avons vu que (contacteur adiabatique) :

$$T_{Ge} - T_{Gs} = \frac{\Delta H_{vap(T_{Gs})}}{C_{p\ air\ humide}} (\omega_s - \omega_e)$$

Et que (Thermomètre humide) :

$$T_G - T_H = \frac{\Delta H_{vap(T_H)}}{h/k_{eau}} (\omega_s - \omega)$$

Or : $\frac{h}{k_{eau} C_{p\ air\ humide}} \approx 1$

La température d'équilibre du thermomètre est presque la même que la température d'équilibre du contacteur adiabatique en circuit fermé : c'est tout simplement la température de saturation adiabatique.

Cela permet de mesurer l'humidité relative du gaz : plus l'air est saturée en humidité, plus la température du thermomètre humide sera éloignée de celle du thermomètre sec.

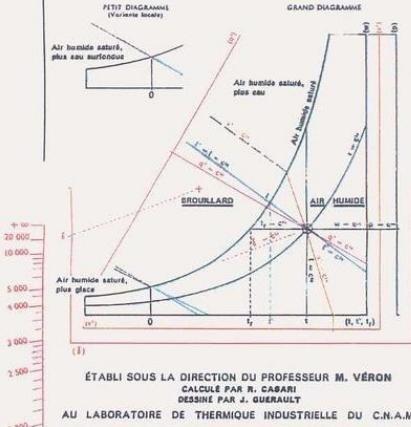
Cette méthode est appelée « méthode du thermomètre humide ». A noter que certaines abaques disposent en plus des isenthalpes d'un réseau de courbe de températures humides, légèrement décalées.

DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

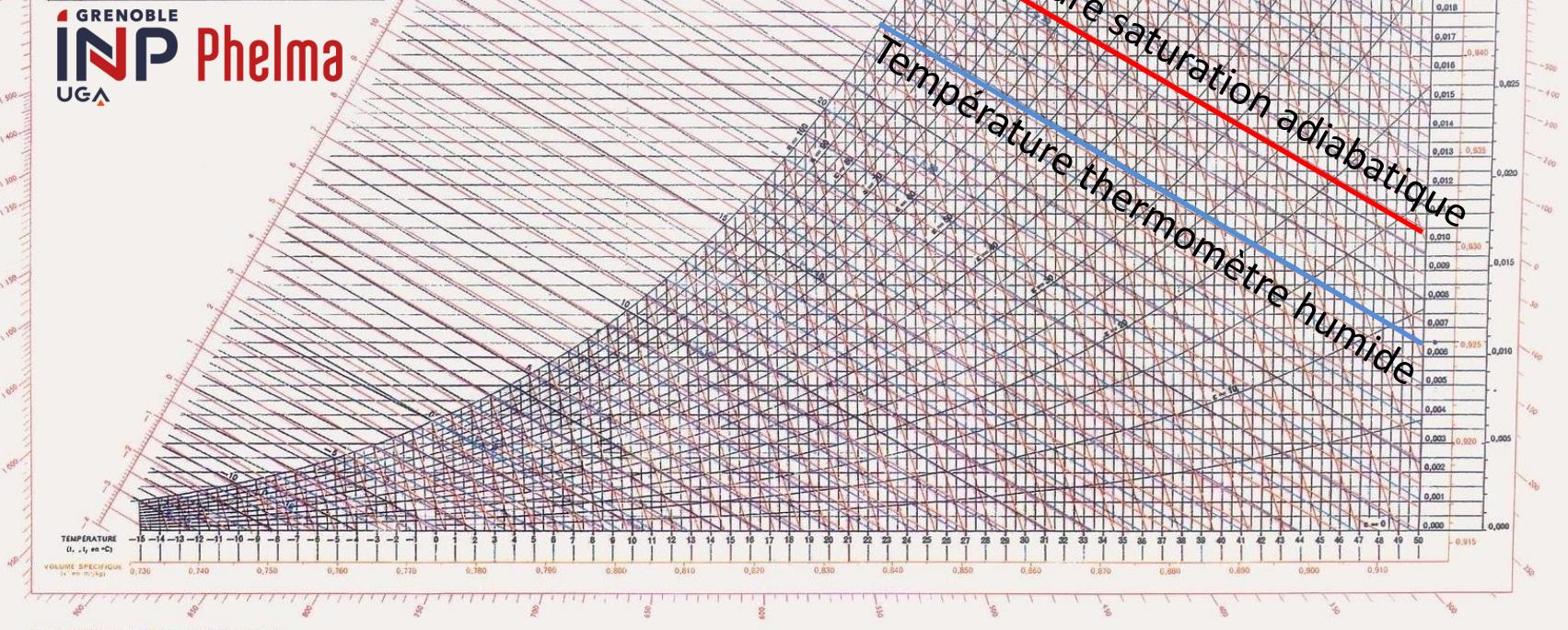
ENTHALPIE — HUMIDITÉ ABSOLUE

Construit en coordonnées obliques, lui restituant la disposition habituelle du diagramme de Carrier (température-humidité absolue).

Pression barométrique normale $P = 1,013 \text{ kg/cm}^2 = 1013 \text{ mb} = 760 \text{ mm Hg}$



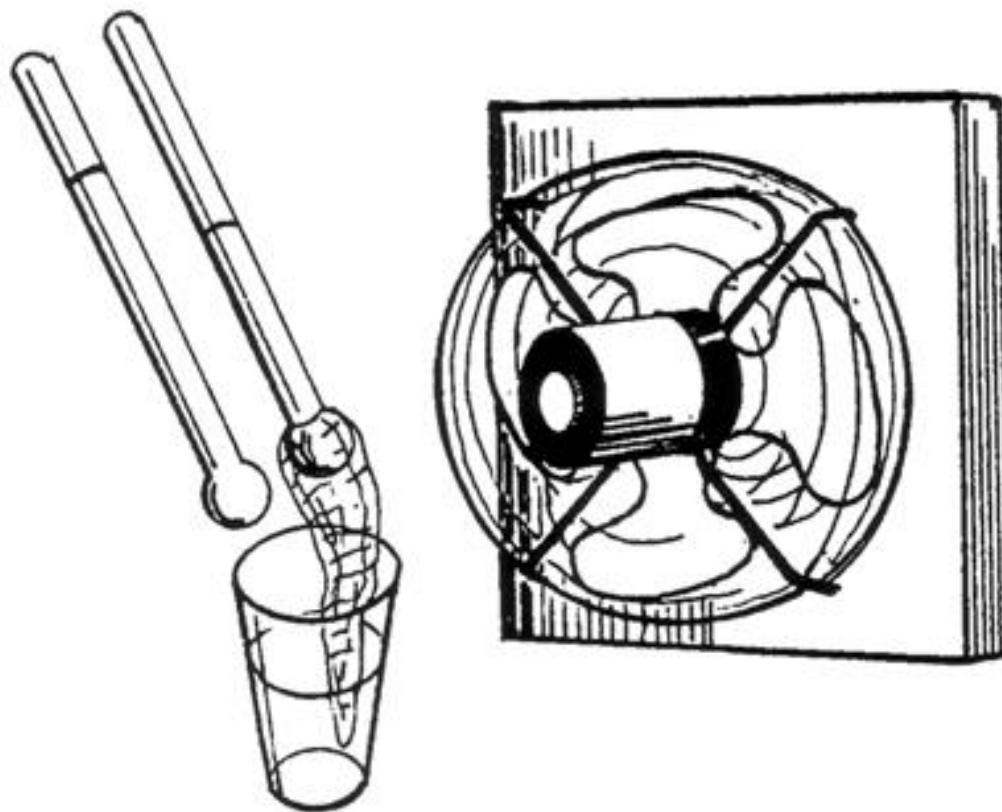
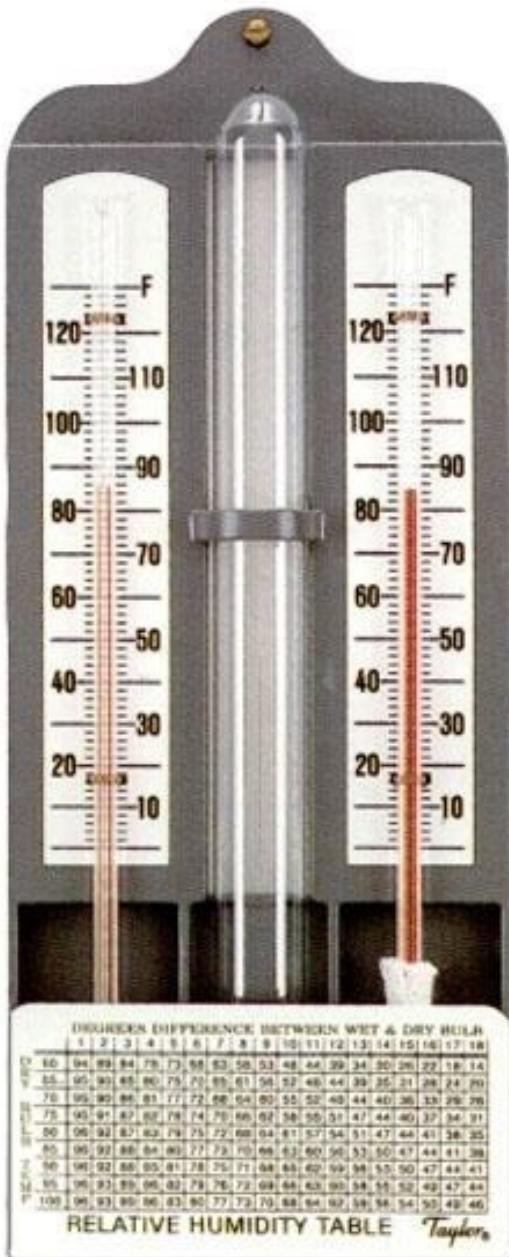
GRENoble
INP Phelma
UGA



w (en kg/kg) Humidité absolue, masse d'humidité par masse unité d'air sec.
 t (en °C) Température sèche de l'air humide.
 E (en %) Humidité relative ou degré hygrométrique.
 t_r (en °C) Température de rosée.
 p (en kg/cm^2) Pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide.

q' (en kcal/kg) Enthalpie de l'air humide contenant la masse unité d'air sec.
 t' (en °C) Température humide.
 v' (en m^3/kg) Volume d'air humide contenant la masse unité d'air sec.
 δ (en kcal/kg) Taux de variation de q' rapporté à la variation de w : $\frac{\Delta q'}{\Delta w}$.
 P (en kg/cm^2) Pression totale du mélange : air sec plus vapeur d'eau. Ici, $P = 1,033 \text{ kg/cm}^2$.

Thermomètres humides



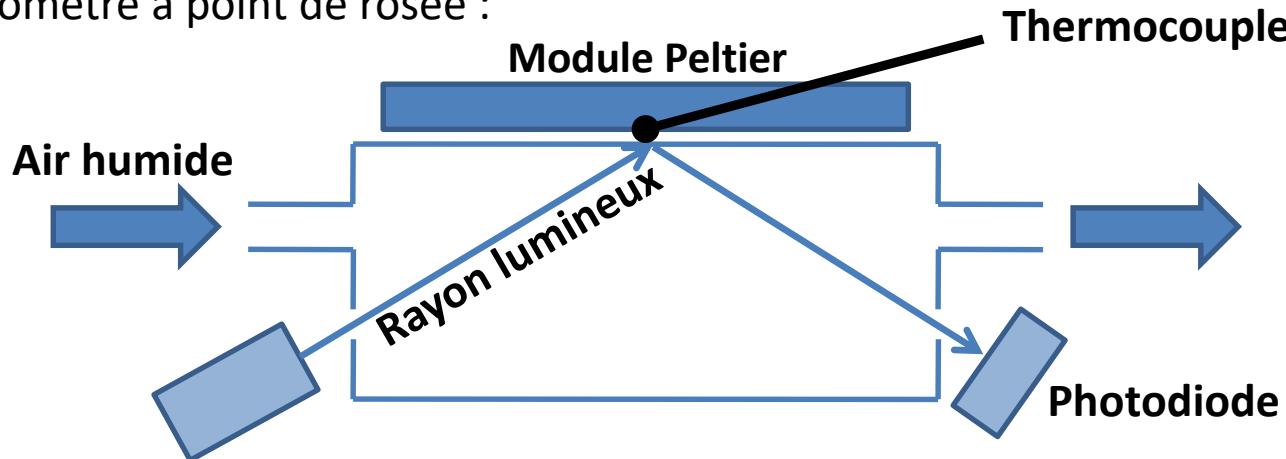
Bien que fonctionnant avec des vitesses de gaz faibles, il est conseillé d'assurer une convection forcée autour d'un thermomètre humide pour que la valeur affichée soit correcte.

Thermomètres humides

Dry Bulb (°C)	Number of degrees difference between the wet- and dry-bulb readings (°C)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	88%	77	66	56	45	35	26	16	7	--
11	89	78	67	57	47	38	28	19	11	2
12	89	79	68	59	49	40	31	22	14	5
13	89	79	69	60	51	42	33	25	16	9
14	90	80	70	61	52	43	35	27	19	11
15	90	80	71	62	54	45	37	29	22	14
16	90	81	72	63	55	47	39	31	24	17
17	91	82	73	64	56	48	41	33	26	19
18	91	82	73	65	57	50	42	35	28	21
19	91	82	74	66	58	51	44	37	30	24
20	91	83	75	67	59	52	45	38	32	26
21	91	83	75	68	60	53	47	40	34	27
22	92	84	76	69	61	54	48	41	35	29
23	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
24	92	84	77	70	63	57	50	44	38	32
25	92	85	77	71	64	57	51	45	40	34
26	92	85	78	71	65	58	52	46	41	35
27	93	85	78	72	65	59	53	47	42	37
28	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38
29	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39
30	93	86	80	73	67	61	56	50	45	40
31	93	86	80	74	68	62	57	51	46	41
32	93	87	80	74	68	63	57	52	47	42
33	93	87	81	75	69	63	58	53	48	43
34	93	87	81	75	69	64	59	54	49	44

Mesure du point de rosée

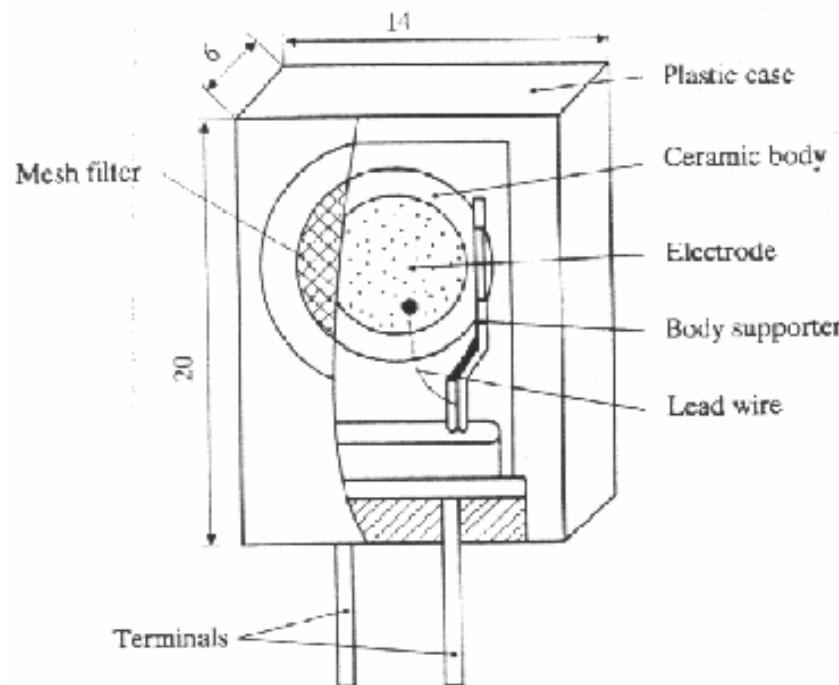
Hygromètre à point de rosée :



Une surface réfléchissante est refroidie jusqu'à apparition de la condensation (chute brutale de l'intensité lumineuse de réflexion directe du faisceau). La température est alors mesurée. -75/+50°C température de rosée. Temps de réponse très long (de l'ordre d'une minute) mais précis. Appareil de moins en moins volumineux.

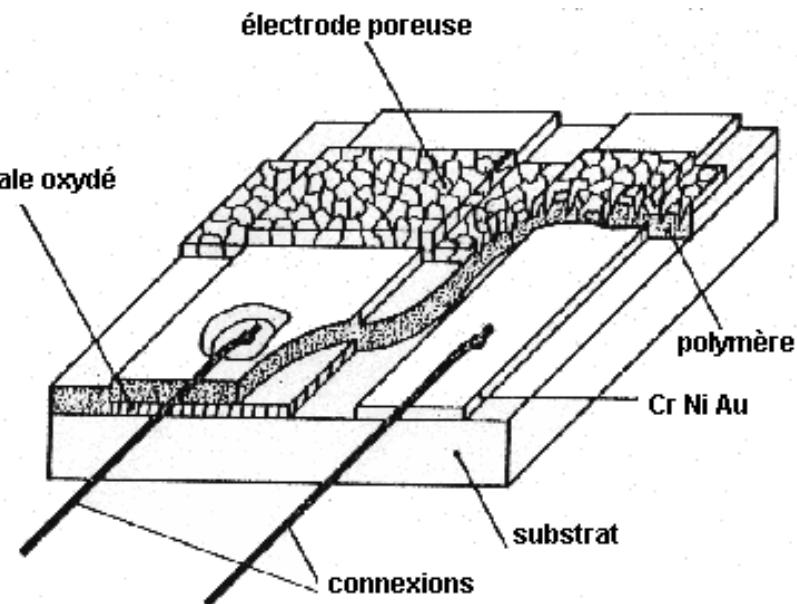


Autres méthodes plus ou moins précises de mesure de l'humidité



Hygromètre résistif : mesure de la résistance d'une céramique hydrophile. Temps de réponse lent en désorption mais précis. Risque de noyage. Dérive en température.

10-80% RH, -20/+80°C



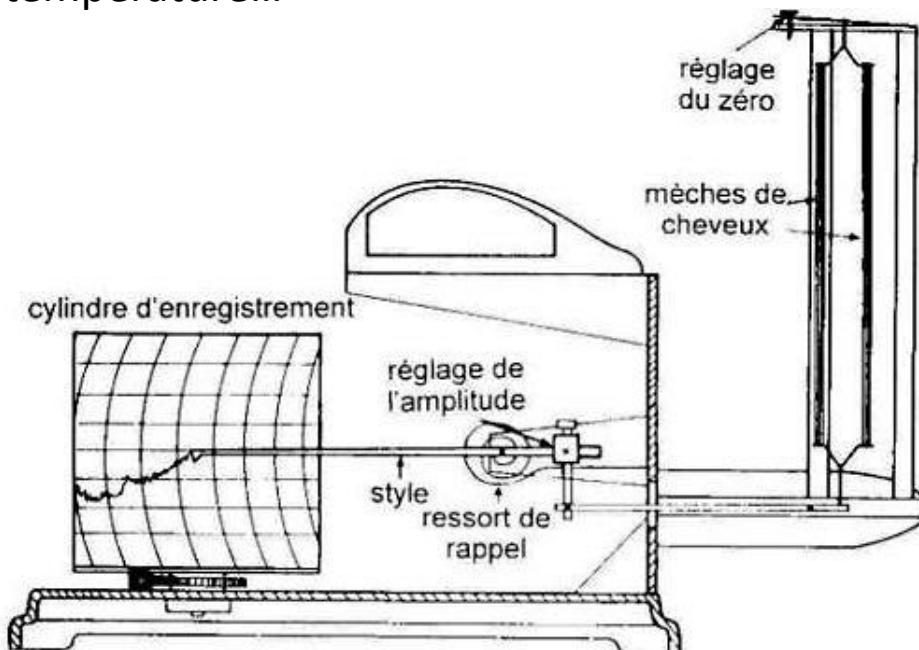
Hygromètre capacitif : mesure de la constante diélectrique d'une céramique hydrophile. Temps de réponse acceptable, précis mais peu reproductible. Risque de noyage, lent en désorption. à étalonner en permanence.

5-99% RH, -40/+80°C

Autres méthodes pas du tout précises de mesure de l'humidité

Changement de couleur du chlorure de cobalt en fonction de son degré d'hydratation. Indication presque tout ou rien (cancérogène, corrosif, allergisant violent...)

Allongement de cheveux humain ou de crin de cheval de 2% en longueur entre 0 et 100% d'humidité, sensible à la température...



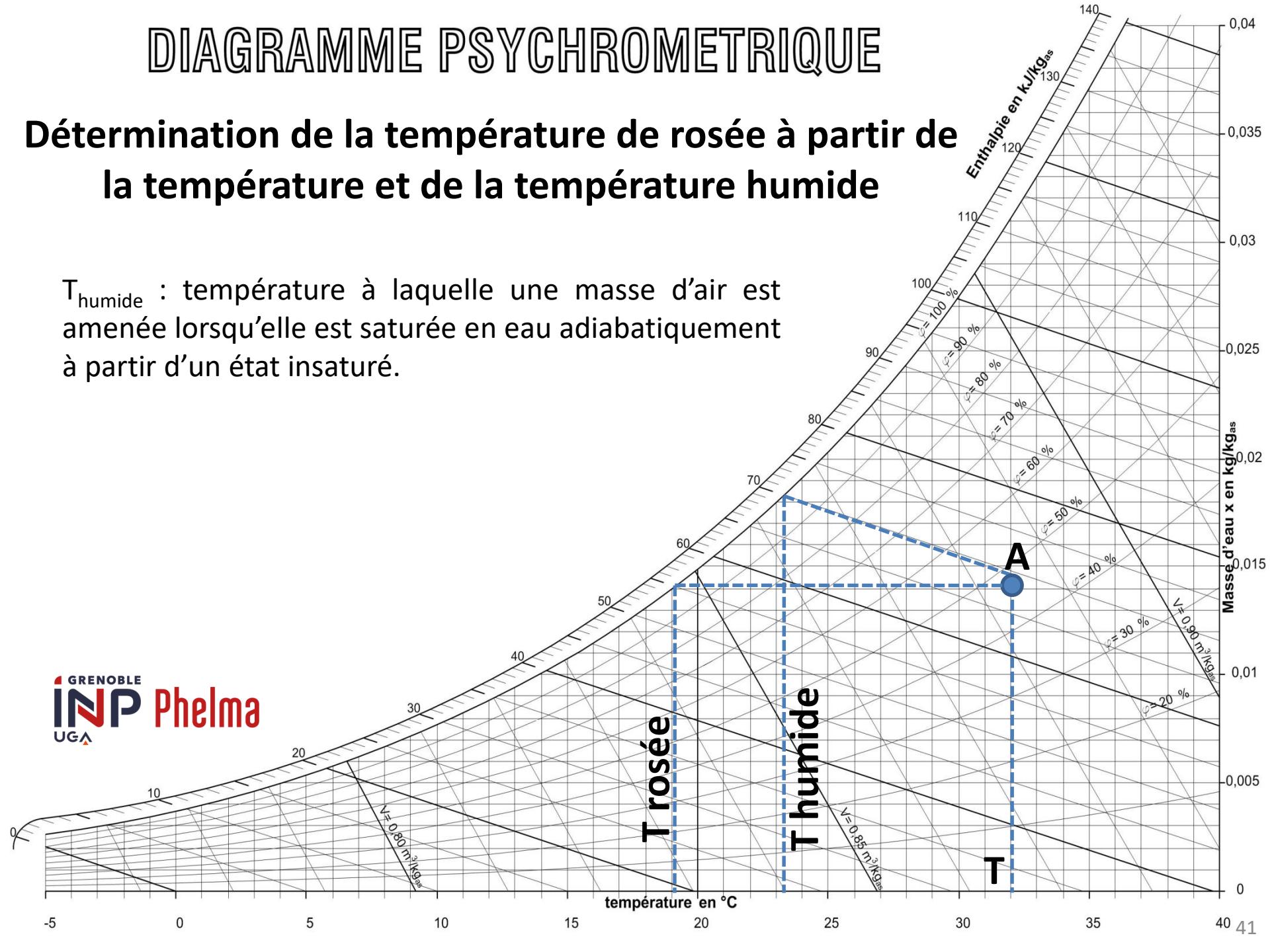
représentation schématique d'un hygrographe à cheveux



DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

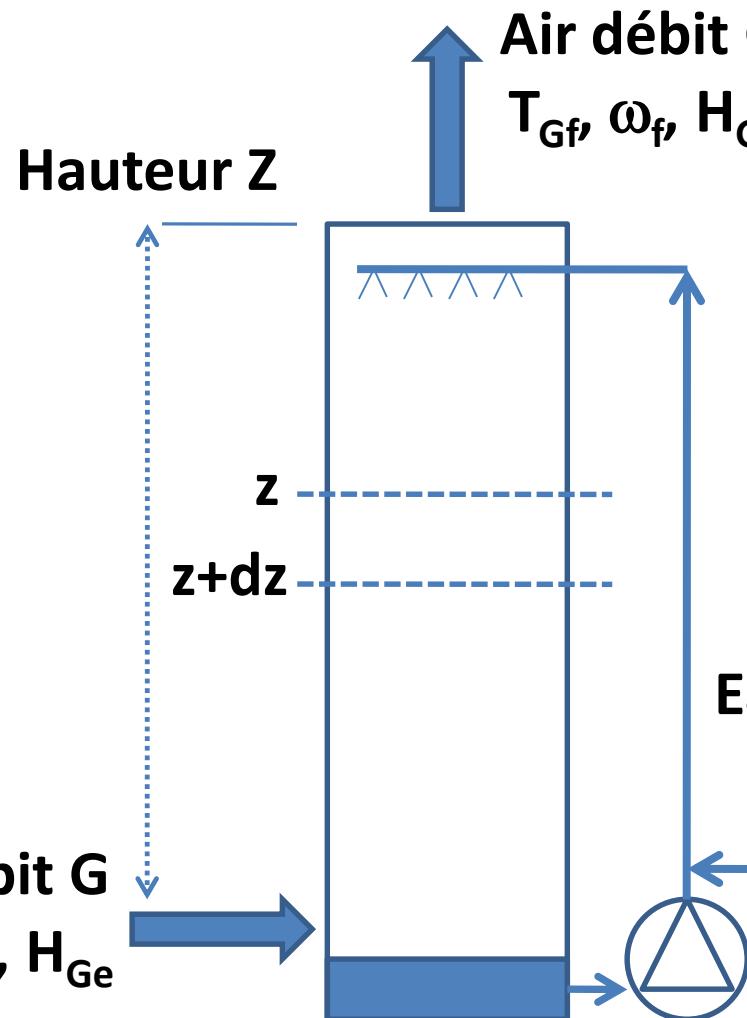
Détermination de la température de rosée à partir de la température et de la température humide

T_{humide} : température à laquelle une masse d'air est amenée lorsqu'elle est saturée en eau adiabatiquement à partir d'un état insaturé.



Tour d'humidification en circuit fermé contre courant

Cette fois l'échangeur n'est pas infini



L'eau est à température de saturation adiabatique : le régime permanent est atteint

L'installation est adiabatique : la chaleur nécessaire à l'évaporation sera transférée depuis le gaz (l'air)

Tour d'humidification en circuit fermé contre courant

Bilan vapeur sur une tranche dz : $d\varphi_{eau} = -dL = G.d\omega$

Bilan enthalpie sur une tranche dz : $d(L.H_L) = d(G.H_G)$

$$\cancel{-L.dH_L + H_L.dL} = G.dH_G + \cancel{H_G.dG}$$

$H_L = cste$ $dL \approx 0$ $G = cste$

A expliciter

G est forcément constant vu l'insolubilité de l'air dans l'eau. H_L est peu variable dans la mesure où l'eau est à sa température d'équilibre. dL varie peu par hypothèse.

Par définition :

$$H_G = C_{p \text{ air humide}}(T_G - T_{ref}) + \omega \Delta H_{vap}(T_{ref})$$

$$dH_G = d(C_{p \text{ air humide}}.T_G) + d\omega \Delta H_{vap}(T_{ref})$$

Donc : $G \left[d(C_{p \text{ air humide}}.T_G) + d\omega \Delta H_{vap}(T_{ref}) \right] = 0$

$$G \left[d \left(C_{p \text{ air humide}} \cdot T_G \right) + d\omega \Delta H_{vap(T_{ref})} \right] = 0$$

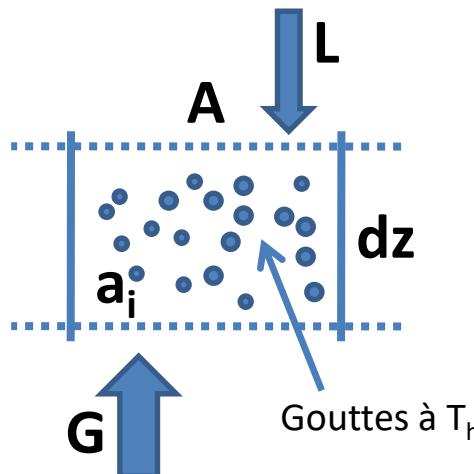
A expliciter A expliciter

$$-G \cdot d \left(C_{p \text{ air humide}} \cdot T_G \right) = G \cdot d\omega \cdot \Delta H_{vap} = d\phi_{chaleur} = \Delta H_{vap} \cdot d\phi_{eau}$$

Pour simplifier, on considère que $C_{p \text{ air humide}} = \text{cste}$

$$d\phi_{chaleur} = -G \cdot C_{p \text{ air humide}} dT_G$$

Echange de matière sur un élément de colonne :



$$d\phi_{eau} = x_s (d\phi_{eau} + d\phi_{air}) + dS \cdot k_{eau} (x_s - x)$$

Loi de diffusion convection

$$d\phi_{eau} = \frac{k_{eau} (x_s - x) dS}{1 - x_s}$$

m.s^{-1} ou $\text{mol.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

On simplifie car x_s est souvent proche de 0 :

$$m^3_{\text{vapeur}} \cdot s^{-1} d\varphi_{eau} = k_{eau} \left(x_s - x \right) dS \quad \begin{matrix} m \cdot s^{-1} \\ [-] \end{matrix} \quad m^2$$

On change les unités : $\frac{kg_{\text{air sec}} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}}{kg_{\text{eau}} / kg_{\text{air sec}}} \quad m^2$

$$\frac{kg_{\text{eau}} \cdot s^{-1}}{} d\varphi_{eau} = k_{eau} (\omega_s - \omega) dS \quad m^2$$

On développe :

$$d\varphi_{eau} = k_{eau} (\omega_s - \omega) A \cdot a_i \cdot dz$$

m^2 m^2/m^3 m

Echange de chaleur sur un élément de colonne :

$$d\varphi_{chaleur} = h(T_G - T_h) A \cdot a_i \cdot dz$$

En chaque point de la colonne :

$$d\varphi_{chaleur} = \Delta H_{vap(T_{ref})} \cdot d\varphi_{eau}$$

En regroupant tous les termes :

$$\begin{aligned} G \cdot d\omega \cdot \Delta H_{vap} &= \Delta H_{vap} \cdot k_{eau} (\omega_s - \omega) \cdot A \cdot a_i \cdot dz \\ &= -G \cdot C_{p \text{ air humide}} dT_G = h(T_G - T_h) \cdot A \cdot a_i \cdot dz \end{aligned}$$

Tour d'humidification en circuit fermé

Droites opératoires

De la relation précédente on obtient :

$$\frac{d\omega}{dT_G} = -\frac{C_{p \text{ air humide}}}{\Delta H_{vap(T_G)}} = \frac{k_{eau} \cdot C_{p \text{ air humide}}}{h} \cdot \frac{\omega_s - \omega}{T_G - T_h}$$

≈ 1 (critère de Lewis)

$$\frac{d\omega}{dT_G} = -\frac{C_{p \text{ air humide}}}{\Delta H_{vap(T_{ref})}} \approx \frac{\omega_s - \omega}{T_G - T_h}$$

En chaque point de la colonne, la droite dite « opératoire » de l'échange sur un diagramme de l'air humide est une droite de pente $-C_{p \text{ air humide}}/\Delta H_{vap}$ (donc une droite isenthalpique) passant par le point représentatif de l'air en entrée (T_G , ω) et croisant éventuellement la courbe de saturation si l'échangeur est assez long.

L'ensemble des équations peut se réécrire :

$$\frac{d\omega}{\omega_s - \omega} = -\frac{k_{eau} C_{p \text{ air humide}}}{h} \approx 1 \quad \frac{dT_G}{T_G - T_h} = \frac{k_{eau} \cdot a_i}{G/A} \cdot dz$$

En intégrant sur l'ensemble de la hauteur de colonne Z, il vient :

$$\ln \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s - \omega_f} = \frac{k_{eau} C_{p \text{ air humide}}}{h} \ln \frac{T_{Ge} - T_h}{T_{Gf} - T_h} = \frac{k_{eau} \cdot a_i}{G / A} \cdot Z$$

Nous allons définir deux variables notées NUT (Nombre d'Unités de Transfert) et HUT (Hauteur d'Unité de Transfert) telles de $Z = \text{HUT} \cdot \text{NUT}$

$$\ln \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s - \omega_f} = \frac{k_{eau} C_{p \text{ air humide}}}{h} \ln \frac{T_{Ge} - T_h}{T_{Gf} - T_h} = \frac{k_{eau} \cdot a_i}{G / A} \cdot Z$$

NUT_G $\frac{1}{\text{HUT}_G}$

$$\frac{\omega_s - \omega_f}{\omega_s - \omega_e} = \exp\left(-\frac{Z}{\text{HUT}_G}\right) \quad \frac{T_{Gf} - T_h}{T_{Ge} - T_h} \approx \exp\left(-\frac{Z}{\text{HUT}_G}\right)$$

Les écarts aux valeurs d'entrée décroissent de manière exponentielle avec le rapport Z/HUT ou NUT .

Tour d'humidification en circuit fermé contre courant

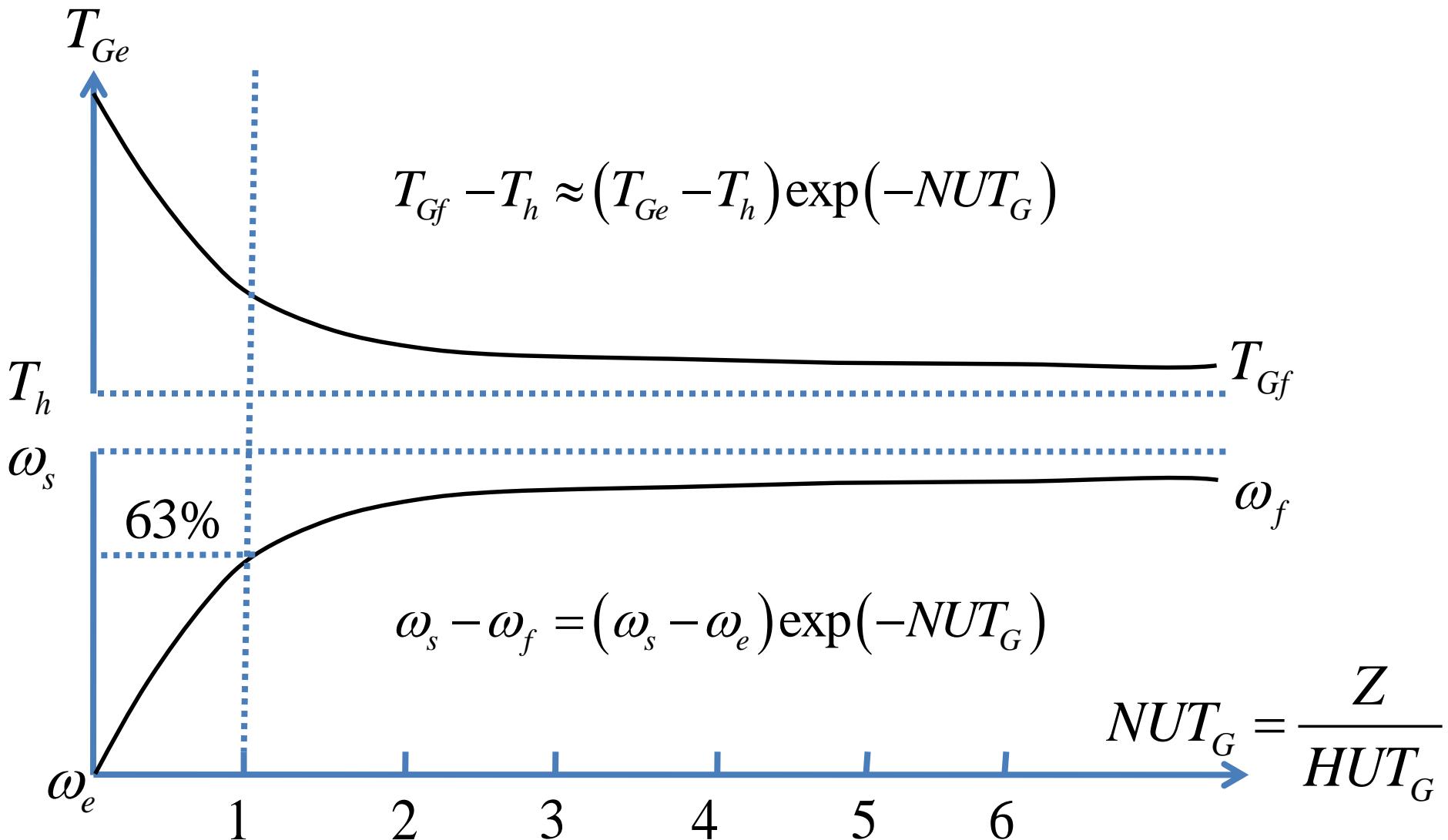


DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Tour d'humidification en circuit fermé

Plus NUT augmente ou plus HUT diminue, plus le point de sortie est proche de la courbe de saturation

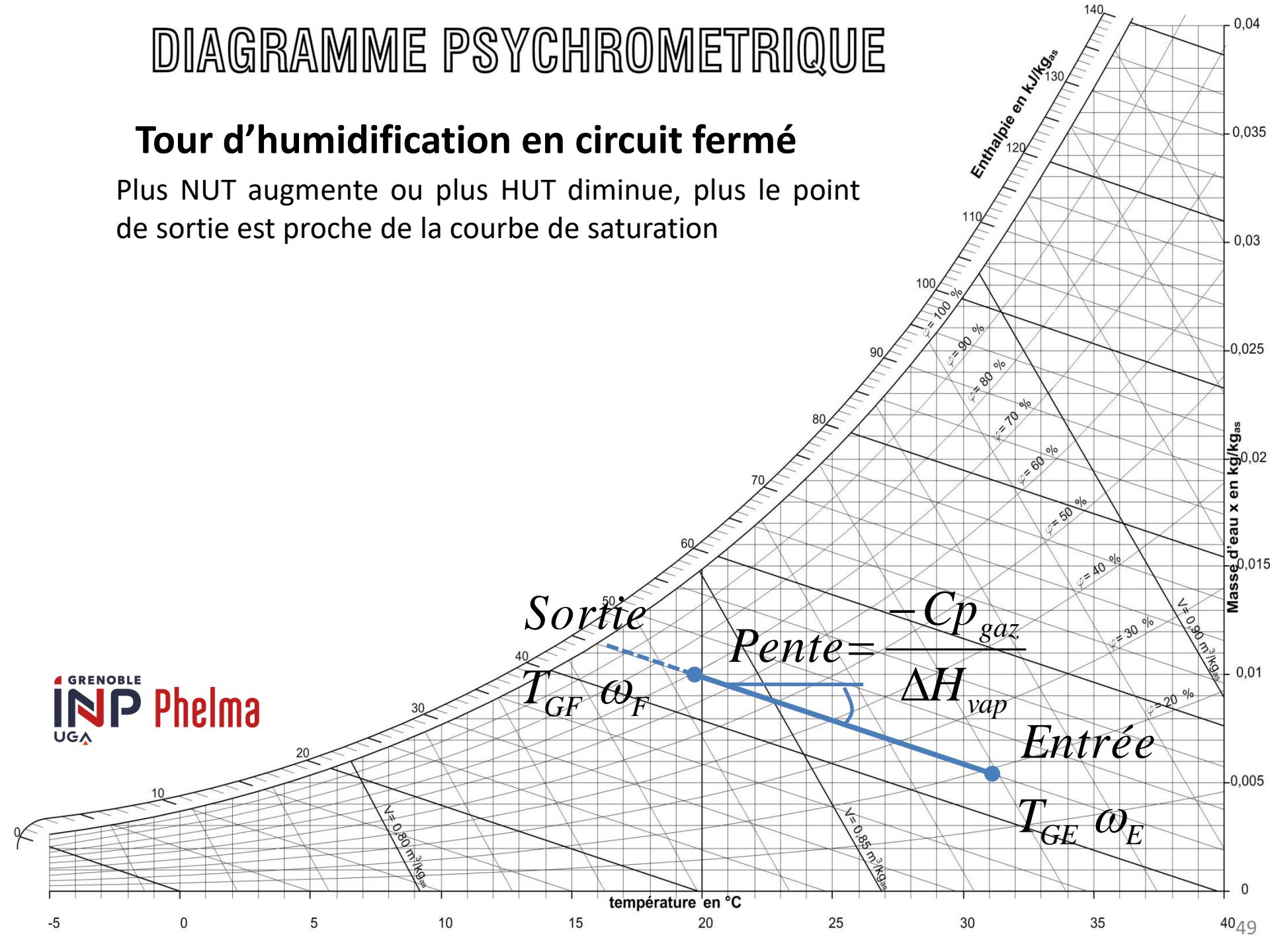
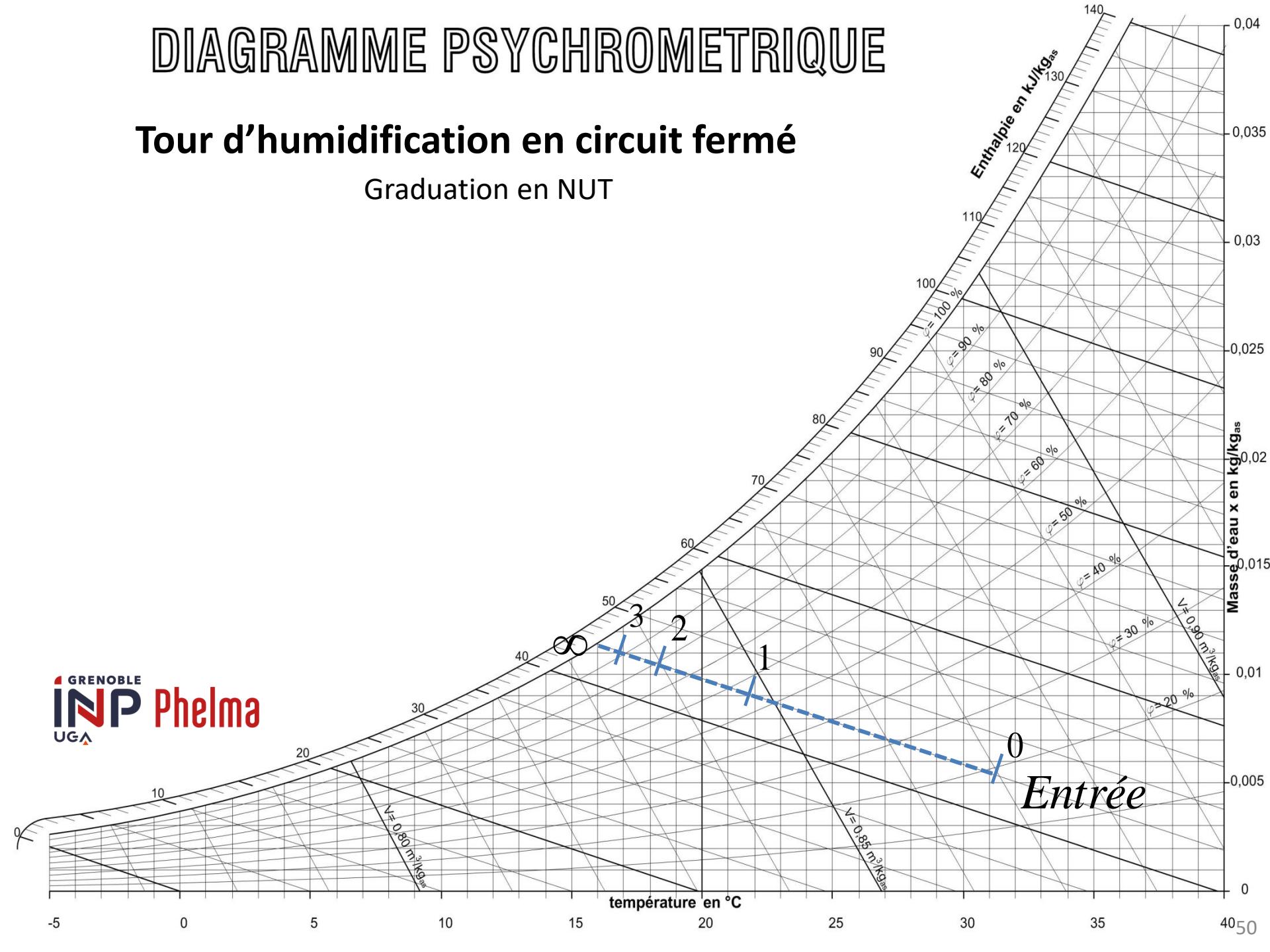


DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

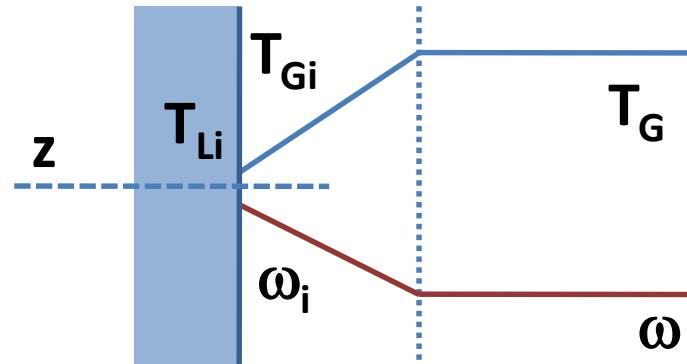
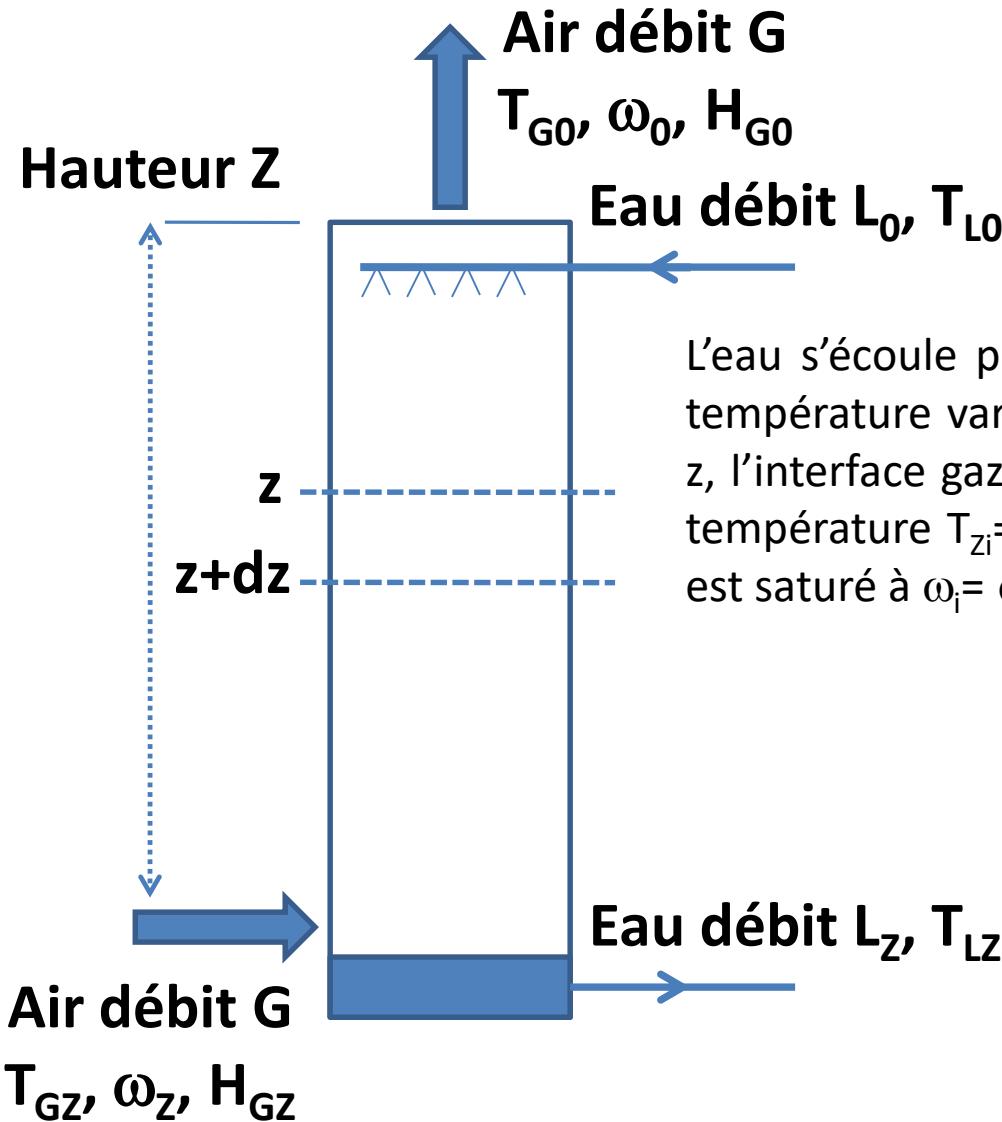
Tour d'humidification en circuit fermé

Graduation en NUT



Tour d'humidification en circuit ouvert contre courant

L'eau n'est plus à température constante



Tour d'humidification en circuit ouvert contre courant

Bilan sur l'eau : $L_0 + G\omega_Z = L_Z + G\omega_0$

Bilan enthalpie : $L_0 H_{L0} + GH_{GZ} = L_Z H_{LZ} + GH_{G0}$

Le débit d'eau circulant dans l'installation étant très supérieur au débit vaporisé, on fait l'hypothèse que L est constant.

Soit : $L(H_{L0} - H_{LZ}) = G(H_{G0} - H_{GZ})$

La différence d'enthalpie du liquide est donnée par :

$$H_{L0} - H_{LZ} = C_{p \text{ eau liquide}} (T_{L0} - T_{LZ})$$

$$\frac{H_{G0} - H_{GZ}}{T_{L0} - T_{LZ}} = \frac{L \cdot C_{p \text{ eau liquide}}}{G}$$

L'ensemble des points de l'installation suivent une droite d'origine H_G et T_L et de pente $L \cdot C_{p \text{ eau liquide}} / G$.

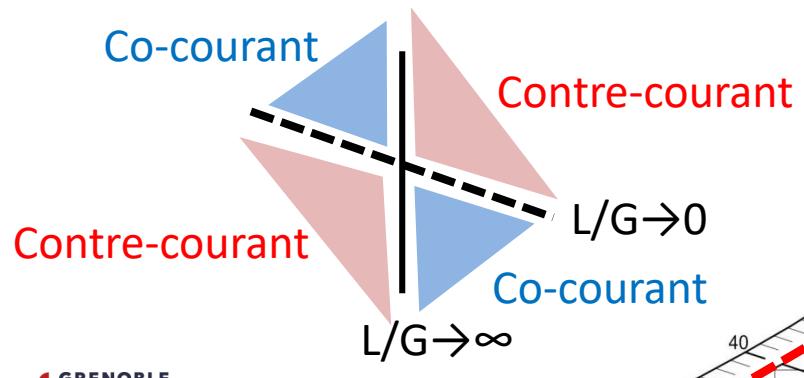
DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Tour d'humidification en circuit ouvert : circulation à contre-courant

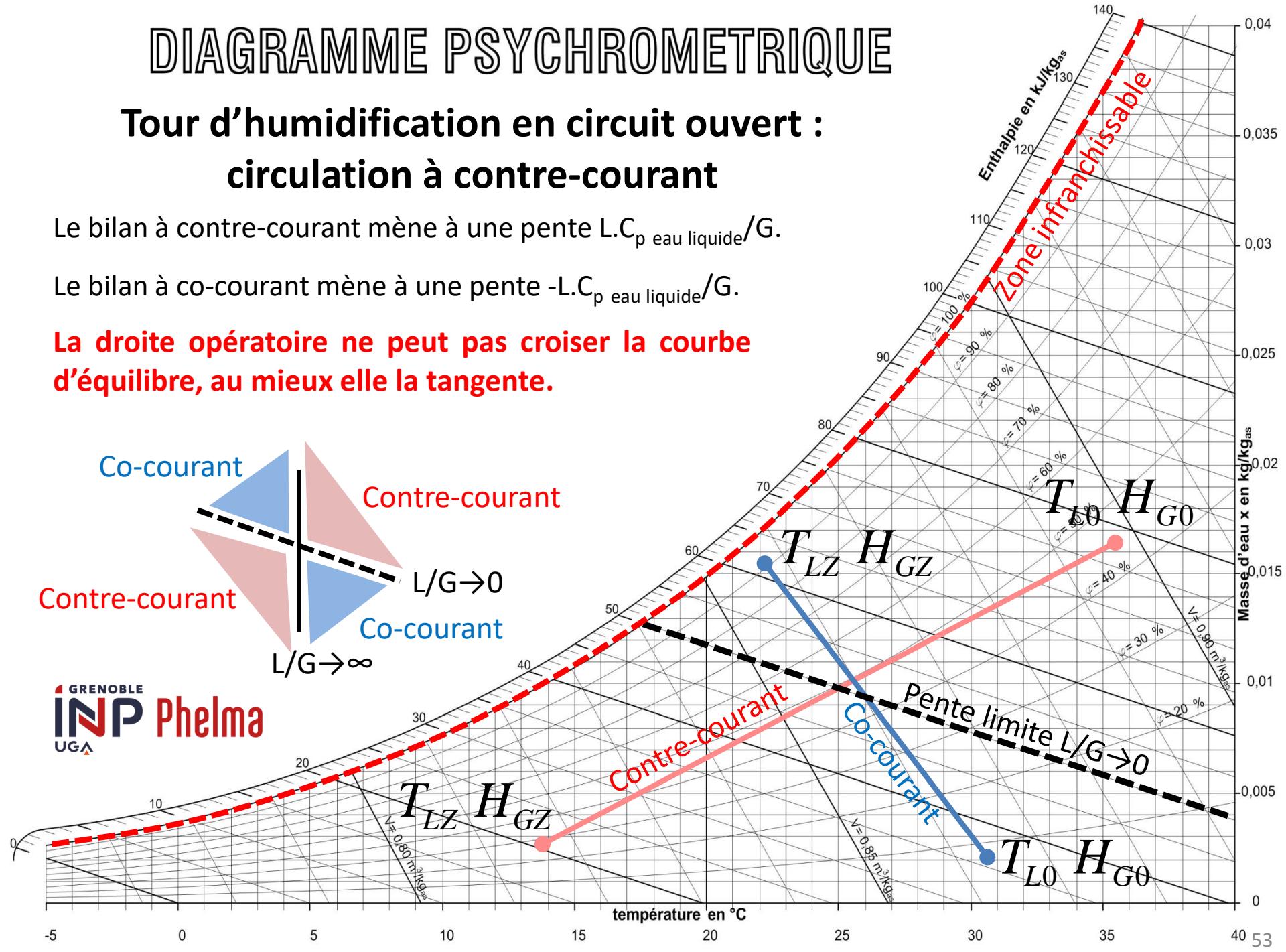
Le bilan à contre-courant mène à une pente $L.C_p$ eau liquide/G.

Le bilan à co-courant mène à une pente $-L.C_p$ eau liquide/G.

La droite opératoire ne peut pas croiser la courbe d'équilibre, au mieux elle la tangente.



GRENOBLE
INP
UGA Phelma



Bilan différentiel sur l'eau : $d\varphi_{eau} = dL = G.d\omega$

Bilan différentiel sur l'enthalpie : $d(L.H_L) = G.dH_G \rightarrow L.dH_L = G.dH_G$

$$L.dH_L = G.(C_{p \text{ air humide}}.dT_G + \Delta H_{vap}.d\omega)$$

Pour simplifier on considère des valeurs moyennes

Flux d'eau vaporisé : $d\varphi_{eau} = k_{eau}(\omega - \omega_i)a_i.A.dz$

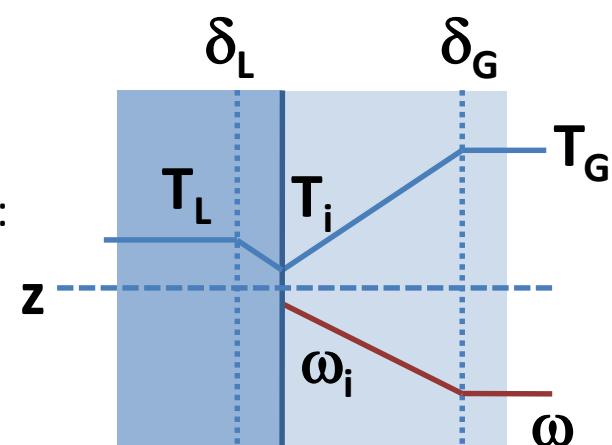
Flux de chaleur transféré à travers la couche limite gaz :

$$d\varphi_{chaleur \text{ gaz}} = h_G(T_i - T_G)a_i.A.dz$$

Flux de chaleur transféré à travers la couche limite liquide :

$$d\varphi_{chaleur \text{ liquide}} = h_L(T_i - T_L)a_i.A.dz$$

Avec : $k_{eau} = \frac{D_{eau-air}}{\delta_g}$ $h_L = \frac{\lambda_{eau}}{\delta_L}$ $h_G = \frac{\lambda_{air}}{\delta_G}$



Quel que soit le sens du flux de chaleur (vers l'interface ou vers le gaz suivant T_i) :

$$d\phi_{chaleur\ liquide} + d\phi_{chaleur\ gaz} + \Delta H_{vap} d\phi_{eau} = 0$$

Séparons les termes gaz des termes liquides :

$$d\phi_{chaleur\ gaz} + \Delta H_{vap} d\phi_{eau} = -d\phi_{chaleur\ liquide}$$

Développons le terme de gauche :

$$d\phi_{chaleur\ gaz} + \Delta H_{vap} d\phi_{eau} = (h_G(T_i - T_G) + \Delta H_{vap} k_{eau}(\omega_i - \omega)) a_i A dz$$



Comme : $h_G \approx C_{p\ air\ humide} \cdot k_{eau}$

$$d\phi_{chaleur\ gaz} + \Delta H_{vap} d\phi_{eau} \approx k_{eau} (C_{p\ air\ humide} (T_i - T_G) + \Delta H_{vap} (\omega_i - \omega)) a_i A dz$$

Comme : $C_{p\ air\ humide} T_i + \Delta H_{vap} \omega_i = H_{Gi}$ $C_{p\ air\ humide} T_G + \Delta H_{vap} \omega = H_G$

$$\text{Il vient : } k_{eau} (H_{Gi} - H_G) a_i . A . dz = -h_L (T_i - T_L) . a_i . A . dz$$

D'où : $\frac{H_{Gi} - H_G}{T_i - T_L} = -\frac{h_L}{k_{eau}}$

$-d\phi_{chaleur \, liquide} = LdH_L = GdH_G$

Le point représentatif de l'interface dans un diagramme de l'air humide à une côte z quelconque est une droite de pente $-h_L/k_{eau}$ passant par un point de la droite opératoire et par la courbe de saturation.

$\frac{H_{Gi} - H_G}{T_i - T_L} = -\frac{h_L}{k_{eau}}$

$\frac{\text{J.kg air sec}}{\text{K}}$

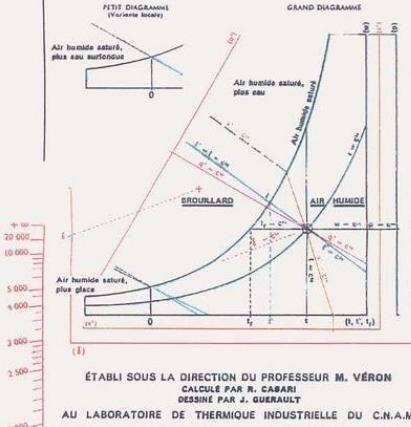
Approximation : Cette pente est très proche d'une verticale, et peut être assimilée comme telle en première approximation. Ceci signifie que les températures de liquide et d'interface sont presque égales en un point z de l'installation, par contre les enthalpies diffèrent notablement. En d'autres termes la chaleur diffuse mieux dans l'eau que dans l'air. *Sur abaque, la pente suit à peu près $\gamma = 560 \text{ kcal/kg}$.*

DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

ENTHALPIE — HUMIDITÉ ABSOLUE

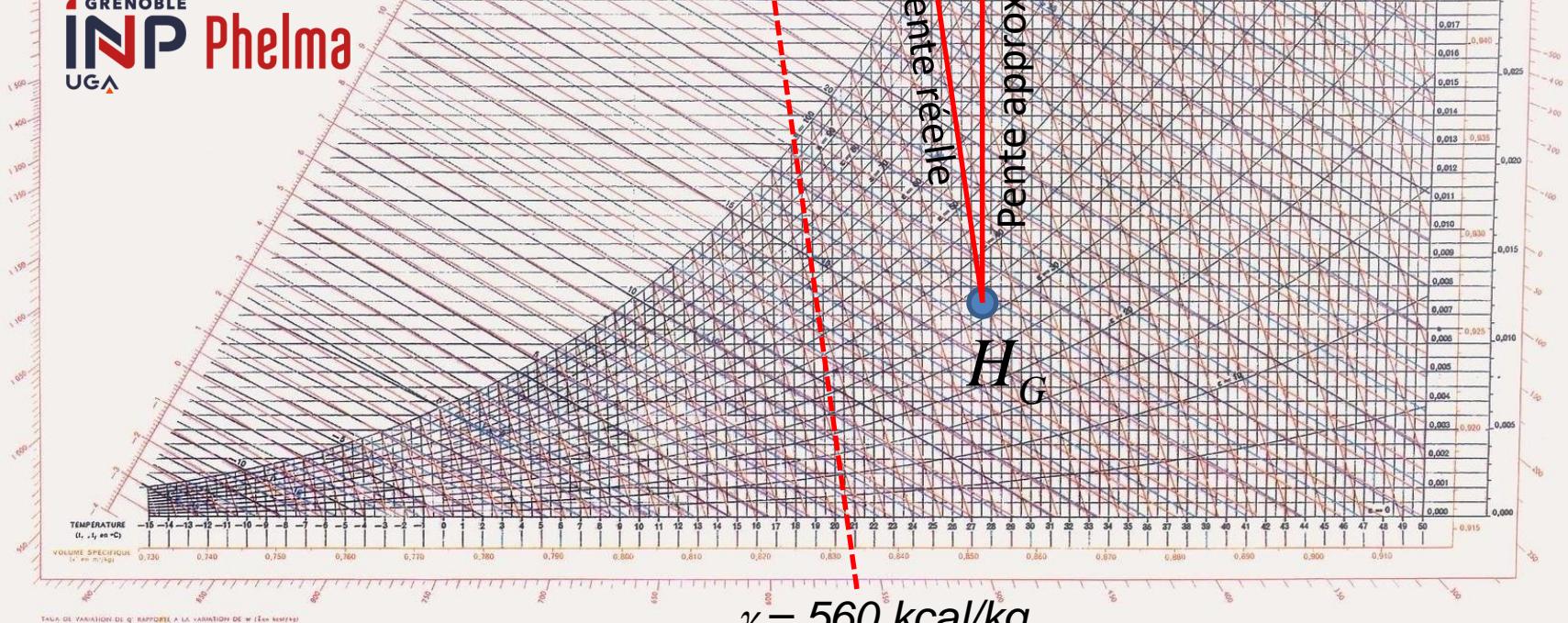
Construit en coordonnées obliques, lui restituant la disposition habituelle du diagramme de Carrier (température-humidité absolue).

Pression barométrique normale $P = 1,013 \text{ kg/cm}^2 = 1013 \text{ mb} = 760 \text{ mm Hg}$



3 600

GRENOBLE
INP Phelma
UGA



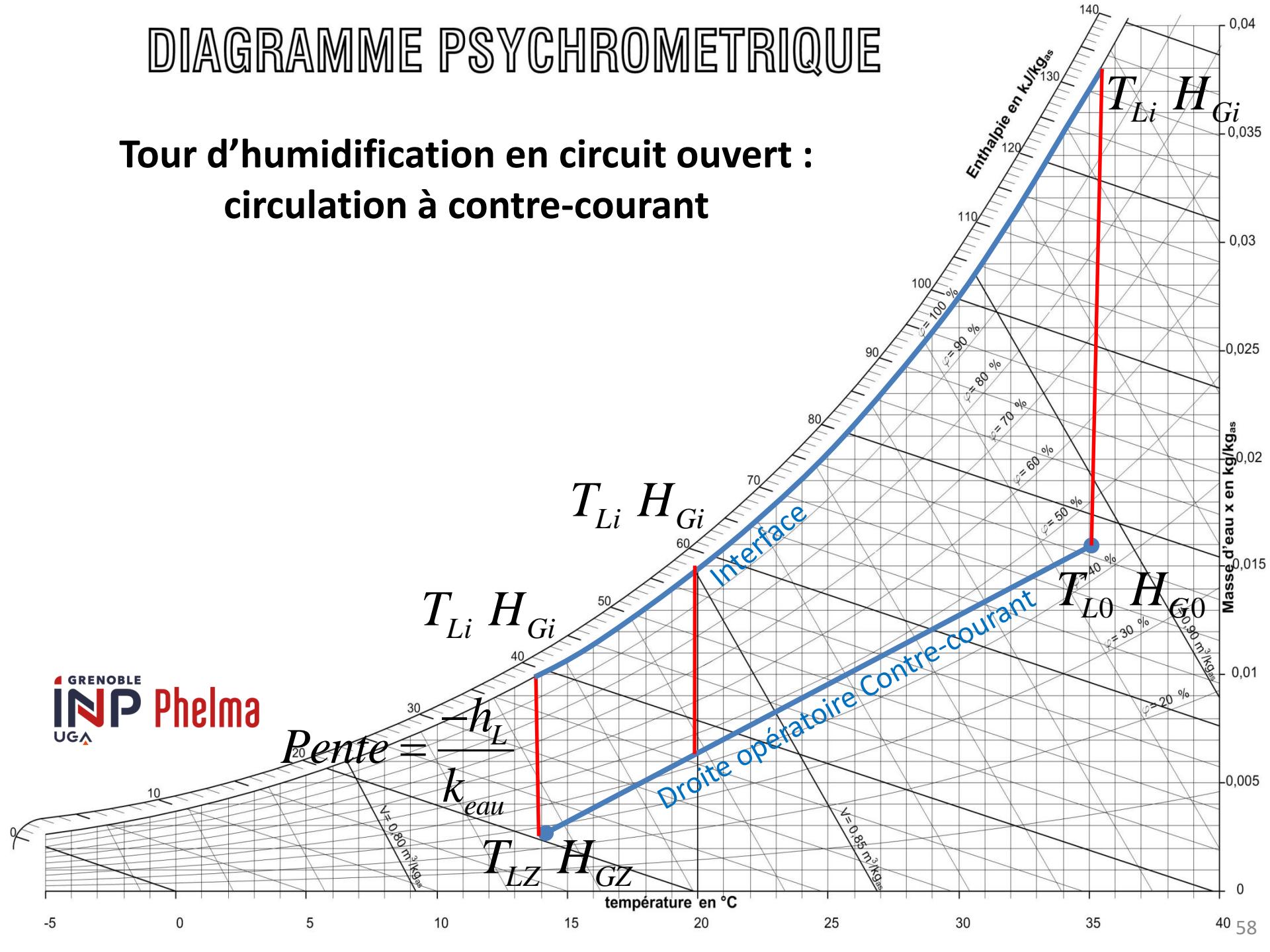
TAU DE VARIATION DE q' RAPPORTÉ À LA VARIATION DE w (en kcal/kg)

w (en kg/kg)	Humidité absolue, masse d'humidité par masse unité d'air sec.
t (en °C)	Température sèche de l'air humide.
E (en %)	Humidité relative ou degré hygrométrique.
t_r (en °C)	Température de rosée.
p (en kg/cm^2)	Pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide.

q' (en kcal/kg)	Enthalpie de l'air humide contenant la masse unité d'air sec.
t' (en °C)	Température humide.
v' (en m^3/kg)	Volume d'air humide contenant la masse unité d'air sec.
$\bar{\delta}$ (en $\text{kcal}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	Taux de variation de q' rapporté à la variation de w : $\frac{\Delta q'}{\Delta w}$.
P (en kg/cm^2)	Pression totale du mélange : air sec plus vapeur d'eau. Ici, $P = 1,033 \text{ kg}/\text{cm}^2$.

DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Tour d'humidification en circuit ouvert :
circulation à contre-courant



Tour d'humidification en circuit ouvert : NUT, HUT

La variation d'enthalpie peut s'écrire :

$$G.dH_G = k_{eau}(H_{Gi} - H_G).a_i.A.dz$$

$$\frac{dH_G}{H_{Gi} - H_G} = \frac{k_{eau}a_i}{G/A} dz \quad HUT_G * NUT_G = Z$$

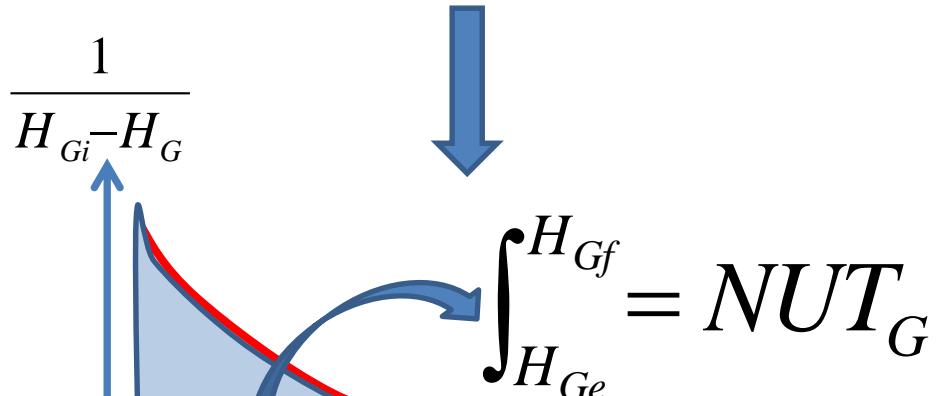
$$NUT_G = \int_{H_{Gf}}^{H_{Ge}} \frac{dH_G}{H_{Gi} - H_G} \quad HUT_G = \frac{G/A}{k_{eau}a_i}$$

L'intégration doit se faire manuellement à partir du diagramme de l'air humide :

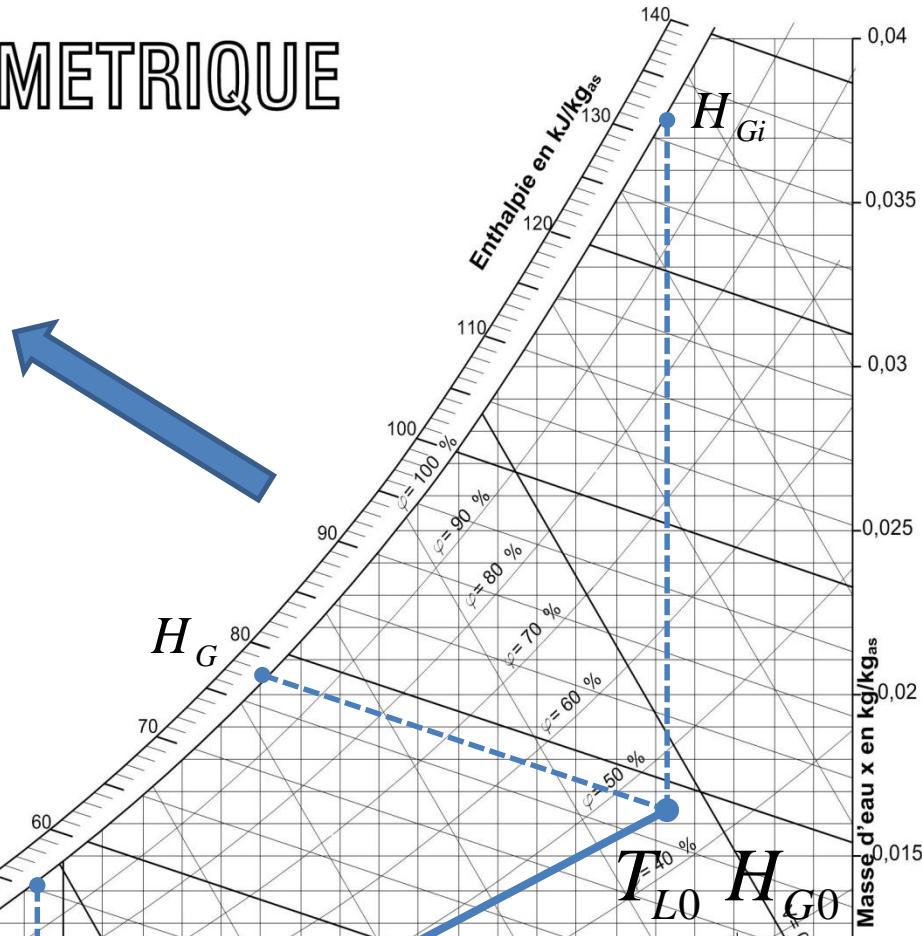
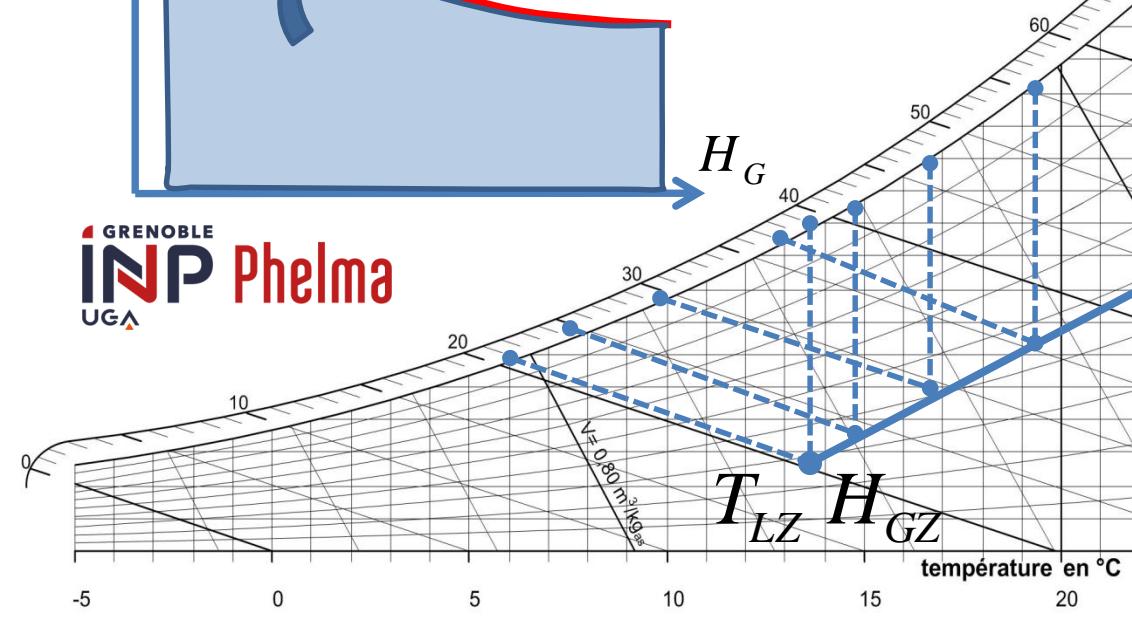
1. On prend un point sur la droite opératoire
2. On mesure H_{Gi} et H_G on calcule la valeur $1/(H_{Gi} - H_G)$
3. On trace la courbe $1/(H_{Gi} - H_G) = f(H_G)$
4. On intègre manuellement la courbe entre H_{Ge} et H_{Gf}

DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

$$\frac{H_G}{H_{Gi} - H_G} = \frac{1}{20} \quad \frac{1}{30} \quad \dots \quad \frac{1}{132}$$



GRENOBLE
INP
UGA Phelma



Température de l'air humide :

$$G.dH_G = k_{eau}(H_{Gi} - H_G).a_i.A.dz$$

$$G.C_{\text{par air humide}}dT_G = h_G(T_i - T_G).a_i.A.dz$$

Divisons membres à membres:

$$\frac{dH_G}{dT_G} = \frac{k_{eau}C_{\text{par air humide}}}{h_G} \cdot \frac{H_{Gi} - H_G}{T_i - T_G}$$

Le tracé se fait de proche en proche :

- On choisit un incrément AB sur la droite opératoire
- On trace BB_i parallèle à AA_i (droite d'interface)
- On joint B_i à A'
- On trace l'isenthalpe passant par B dont l'intersection avec B_iA' donne le point B'
- On prend un nouvel incrément BC sur la droite opératoire
- On trace la droite d'interface CC_i
- On recommence jusqu'à atteindre la fin de la droite opératoire

DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Tour d'humidification en circuit ouvert : circulation à contre-courant Tracé de la température dans la colonne

- Choisir un incrément AB sur la droite opératoire
- Tracer BB_i parallèle à AA_i (droite d'interface)
- Joindre B_i à A'
- Tracer l'isenthalpe passant par B dont l'intersection avec B_iA' donne le point B'
- Prendre un nouvel incrément BC sur la droite opératoire
- Tracer la droite d'interface CC_i
- Recommencer jusqu'à atteindre la fin de la droite opératoire

$$\frac{dH_G}{dT_G} = \frac{H_{Gi} - H_G}{T_i - T_G}$$

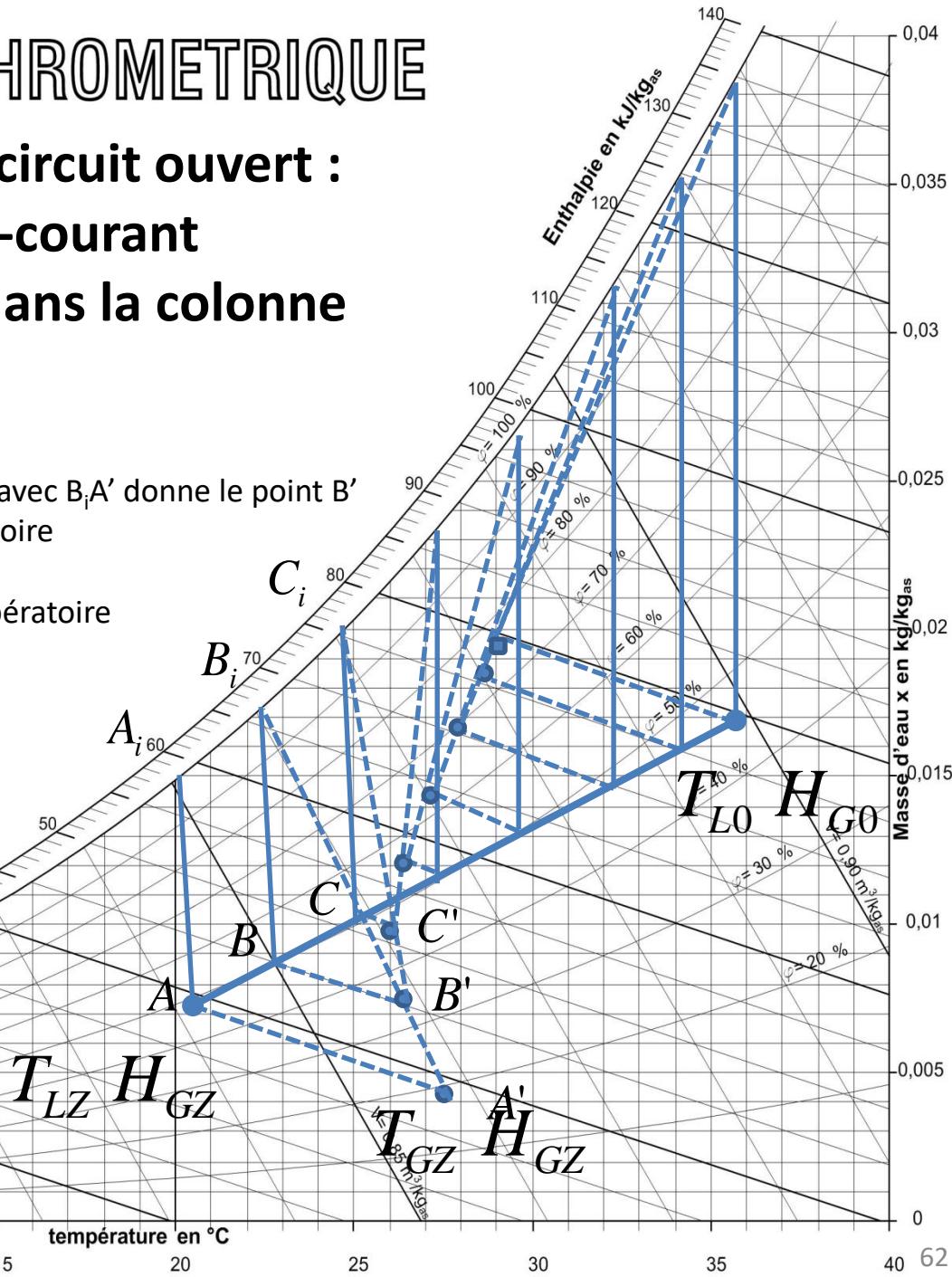
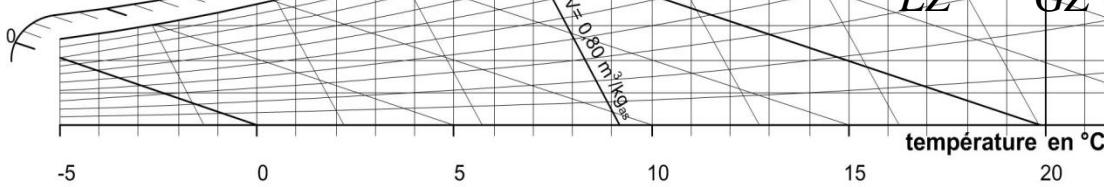
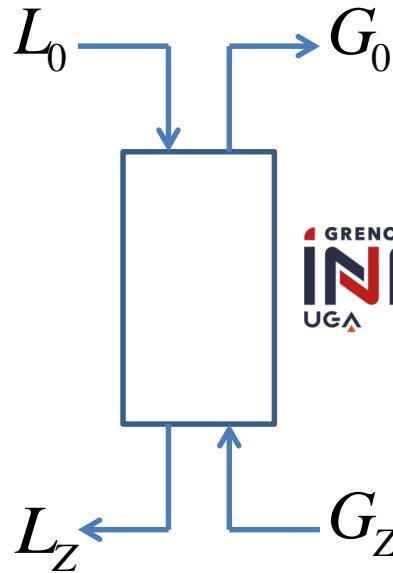


DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Dimensionnement optimal contre-courant

$$\frac{H_{G0\max} - H_{GZ}}{T_{L0} - T_{LZ}} = \frac{L.C_{\text{peau liquide}}}{G_{\min}} = 2 \frac{L.C_{\text{peau liquide}}}{G_{\text{optimal}}}$$



GRENOBLE
INP Phelma

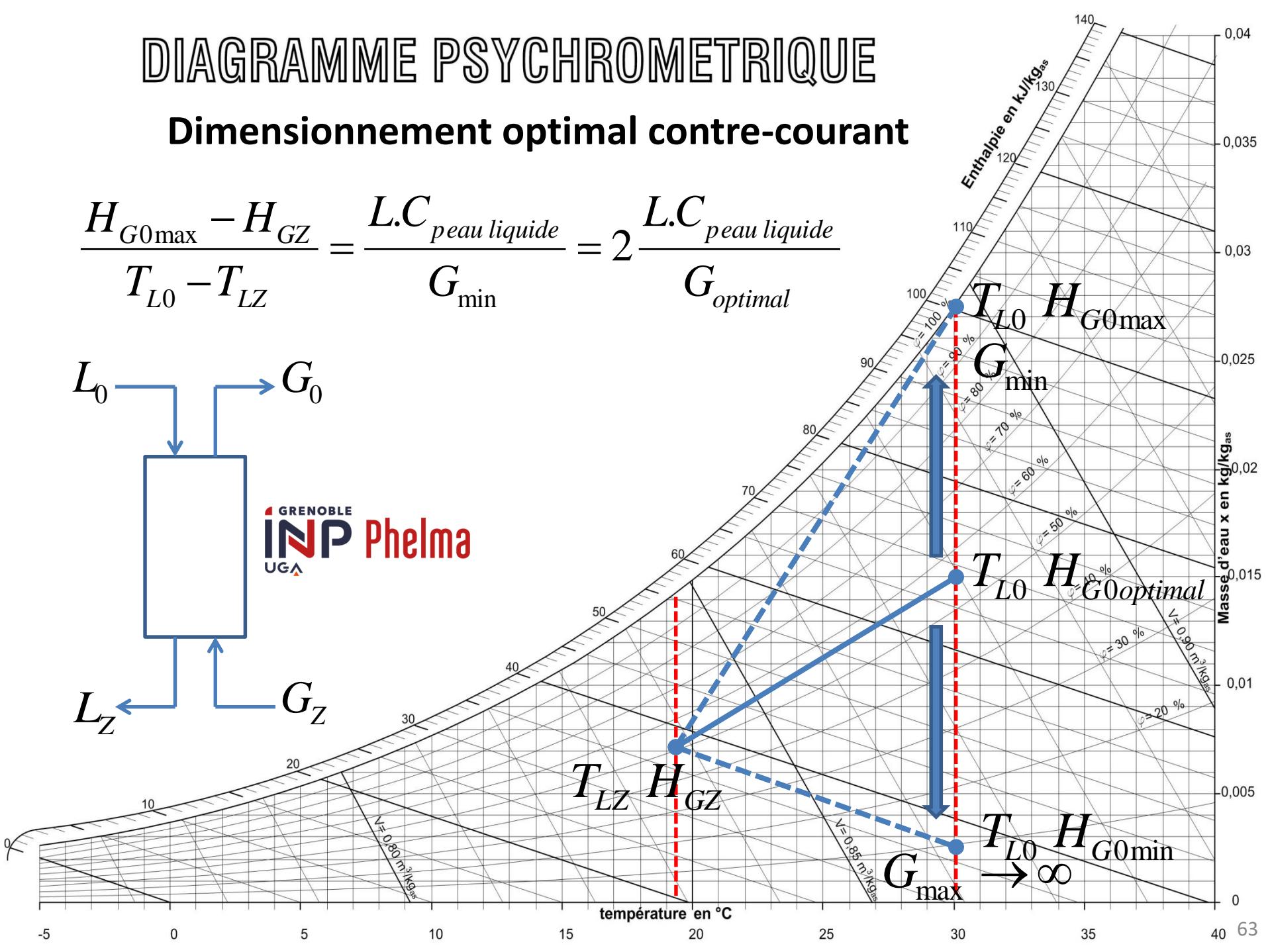
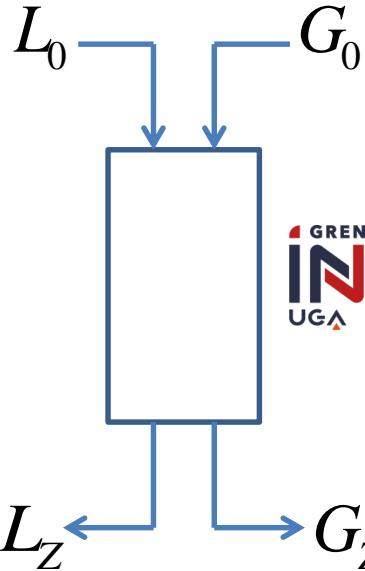


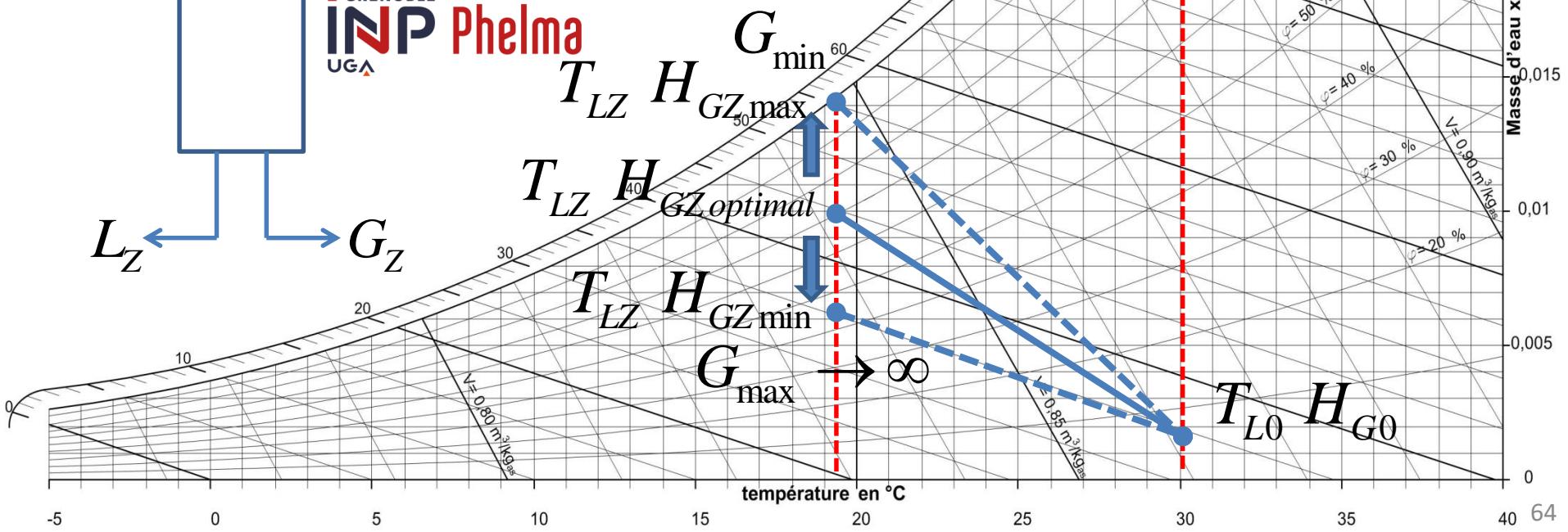
DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Dimensionnement optimal co-courant

$$\frac{H_{G0} - H_{GZ \max}}{T_{L0} - T_{LZ}} = - \frac{L.C_{\text{peau liquide}}}{G_{\min}} = -2 \frac{L.C_{\text{peau liquide}}}{G_{\text{optimal}}}$$



GRENOBLE
INP Phelma
UGA

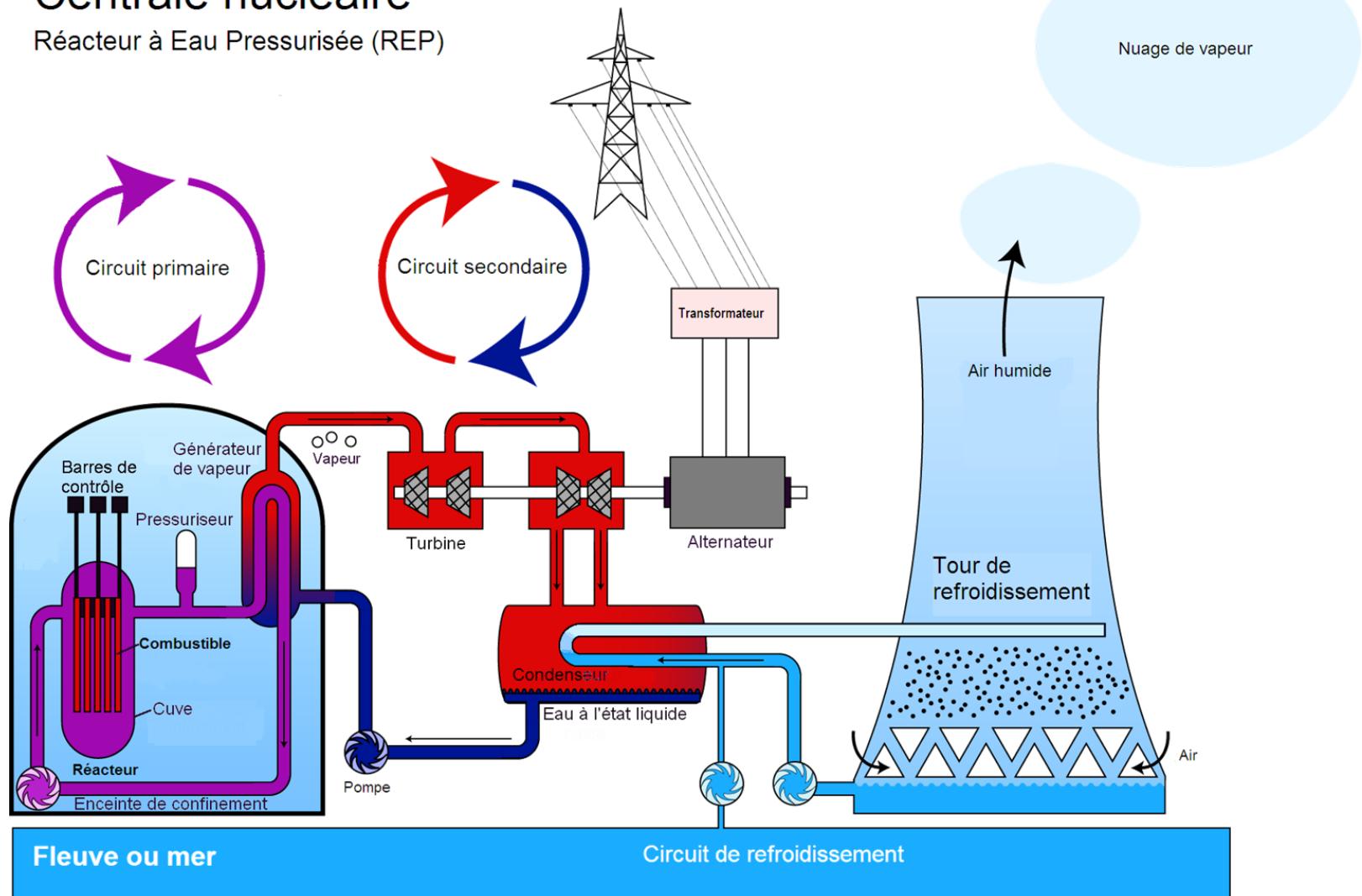


Tour de refroidissement en circuit ouvert contre courant

Mise en situation

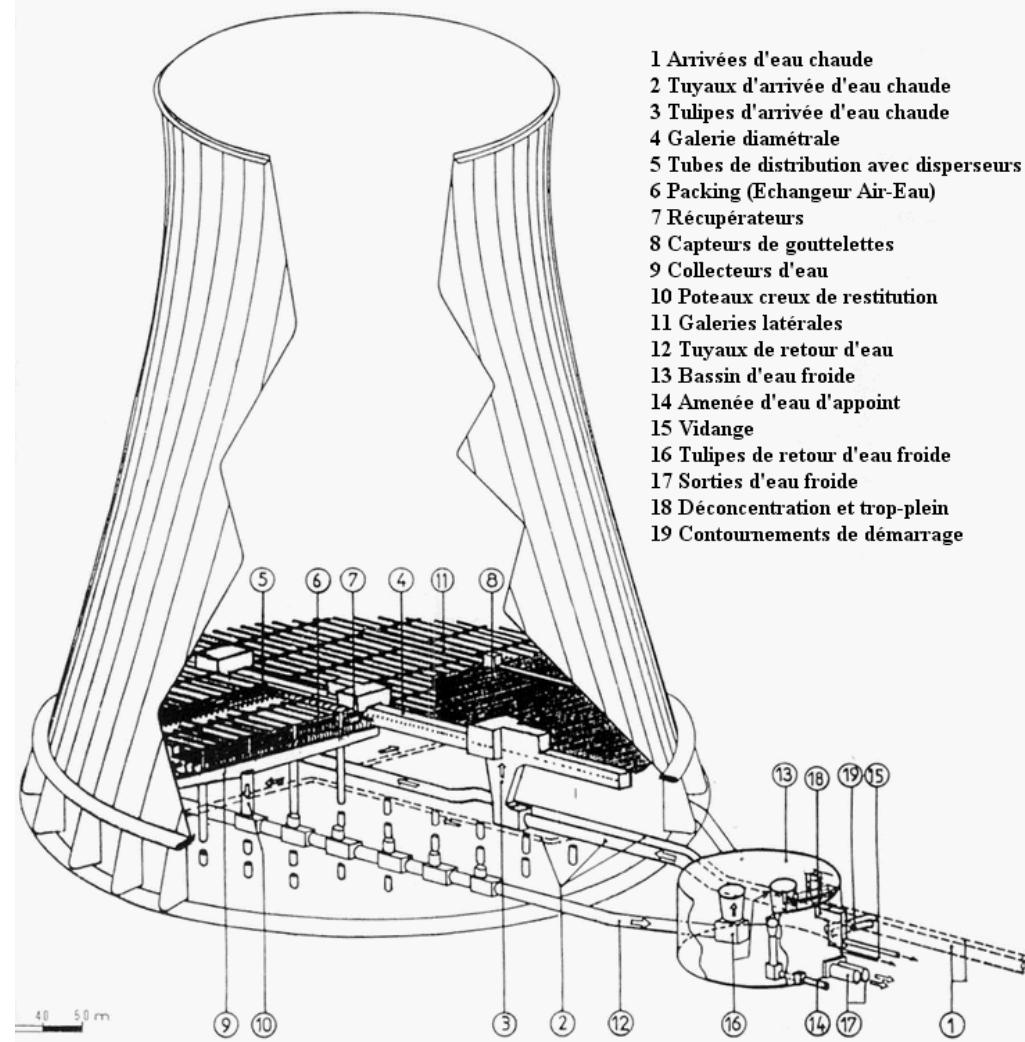
Centrale nucléaire

Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



Tour de refroidissement en circuit ouvert contre courant

Mise en situation



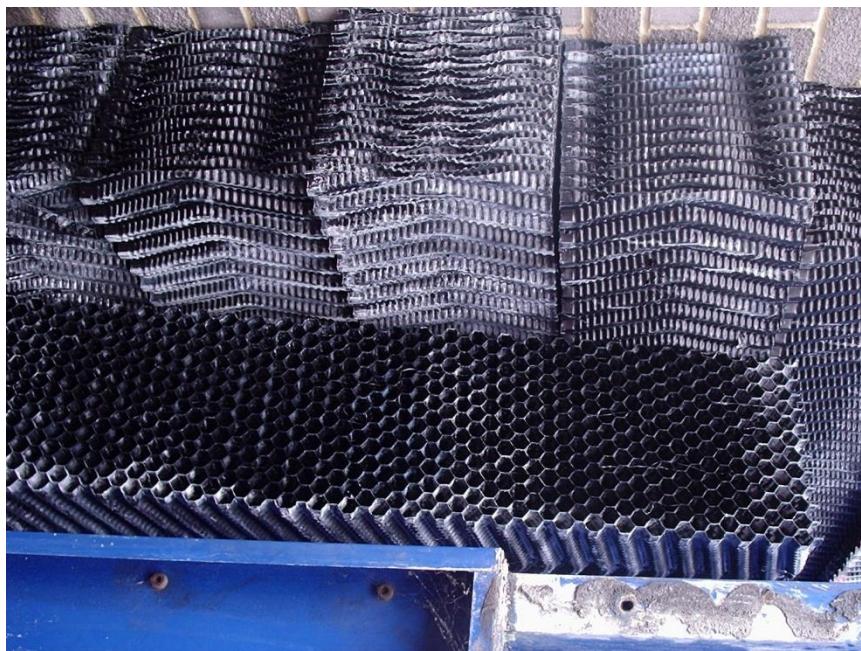
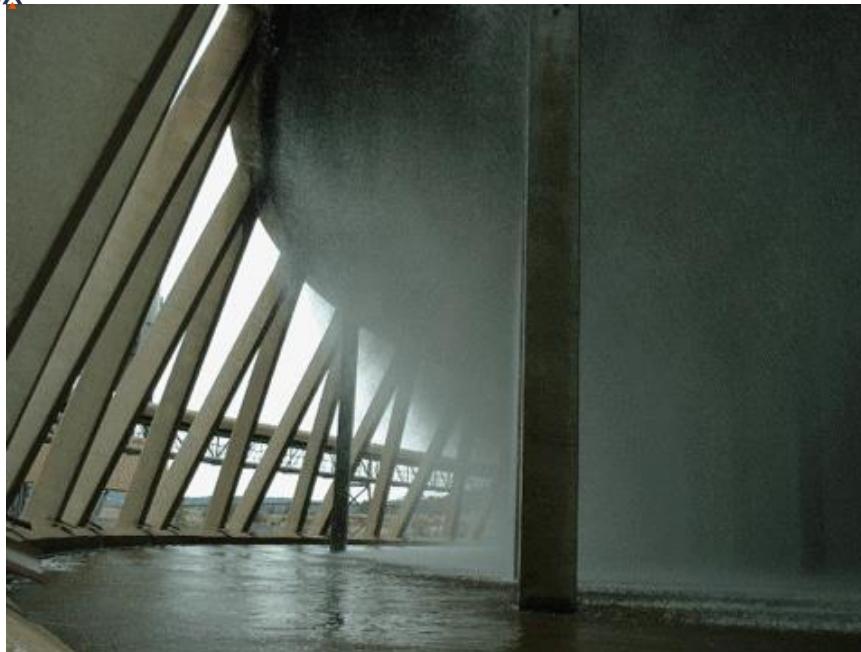
Distribution des fluides



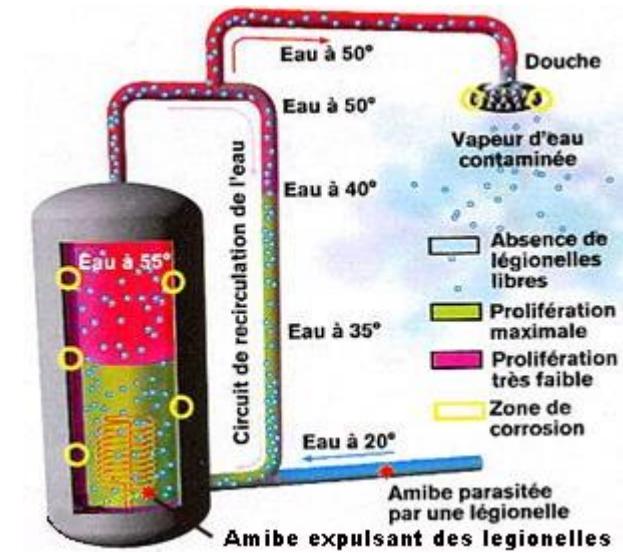
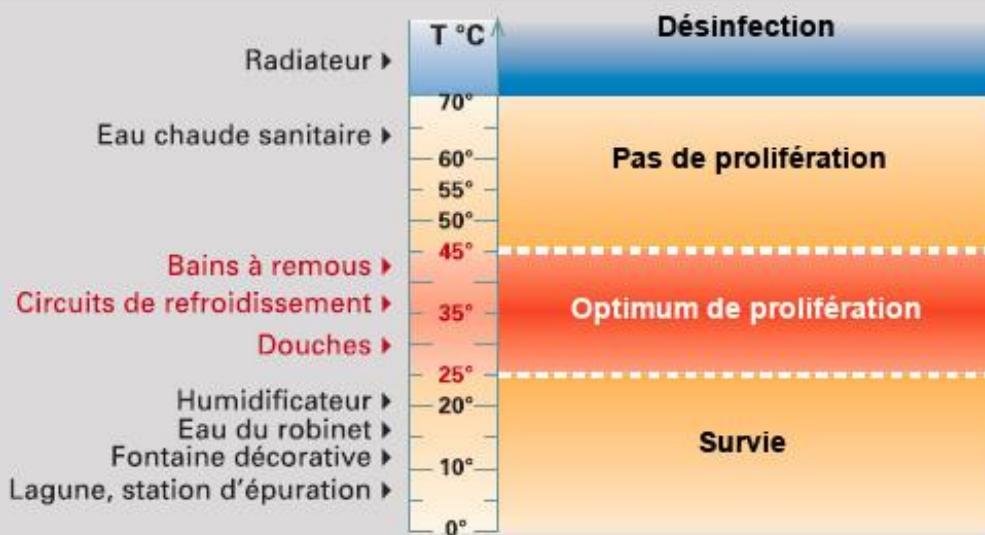
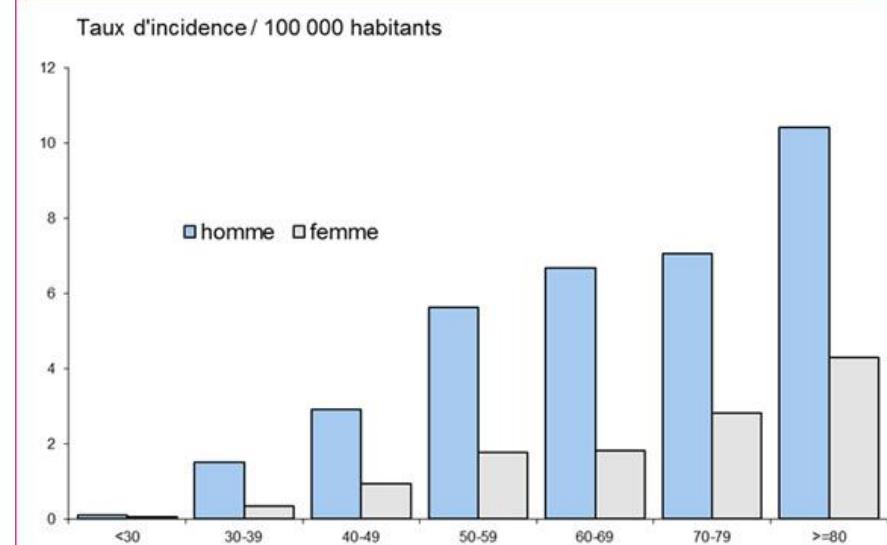
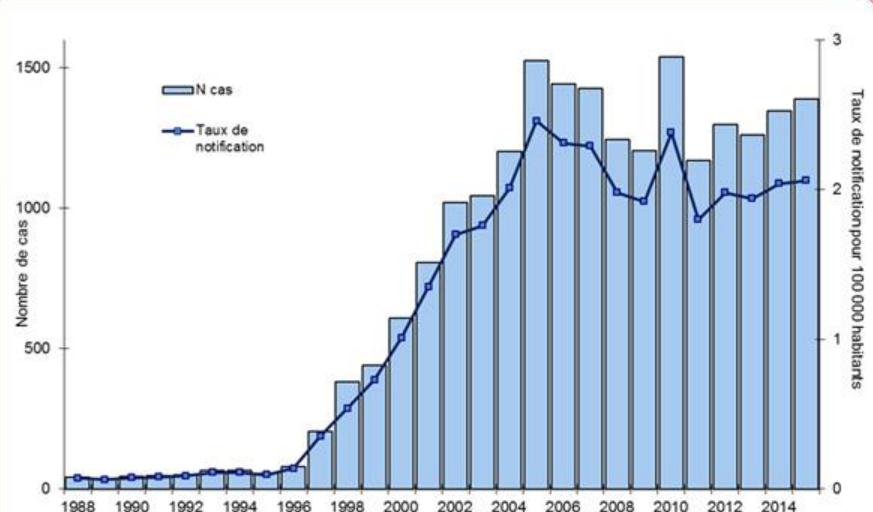
Distribution des fluides et garnissage



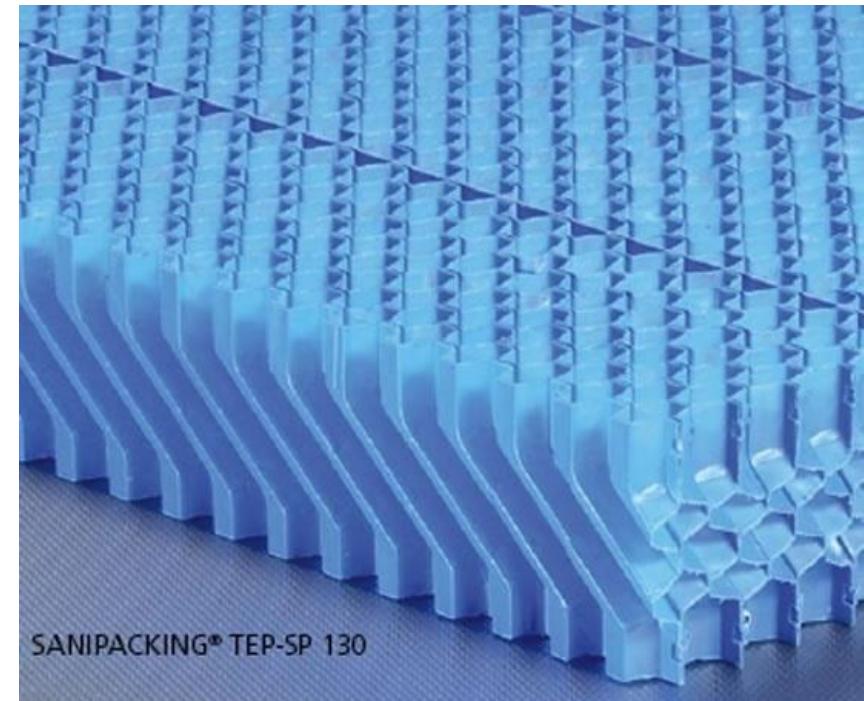
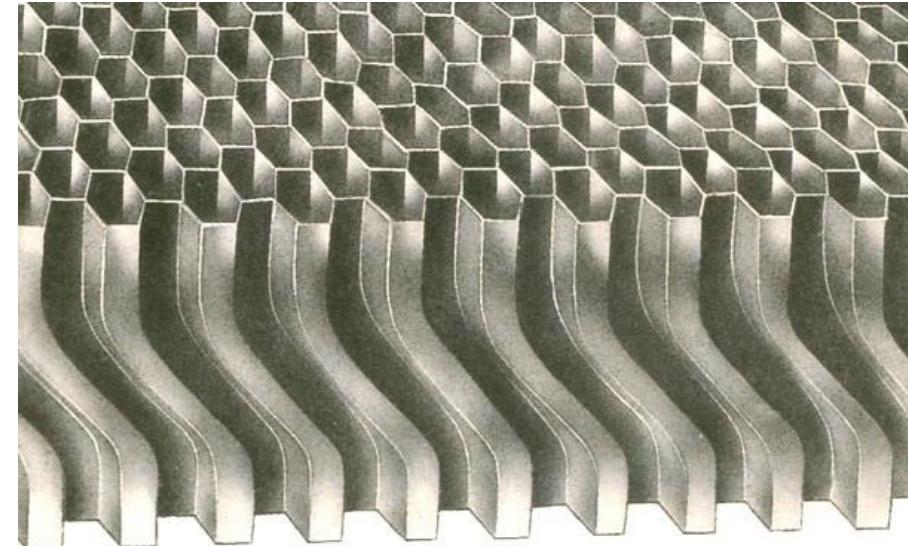
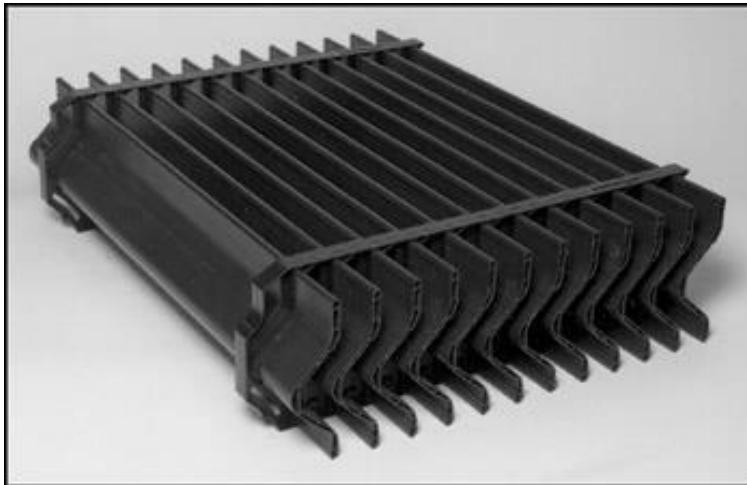
Garnissages



Le cas de la légionellose



Dévésiculeurs

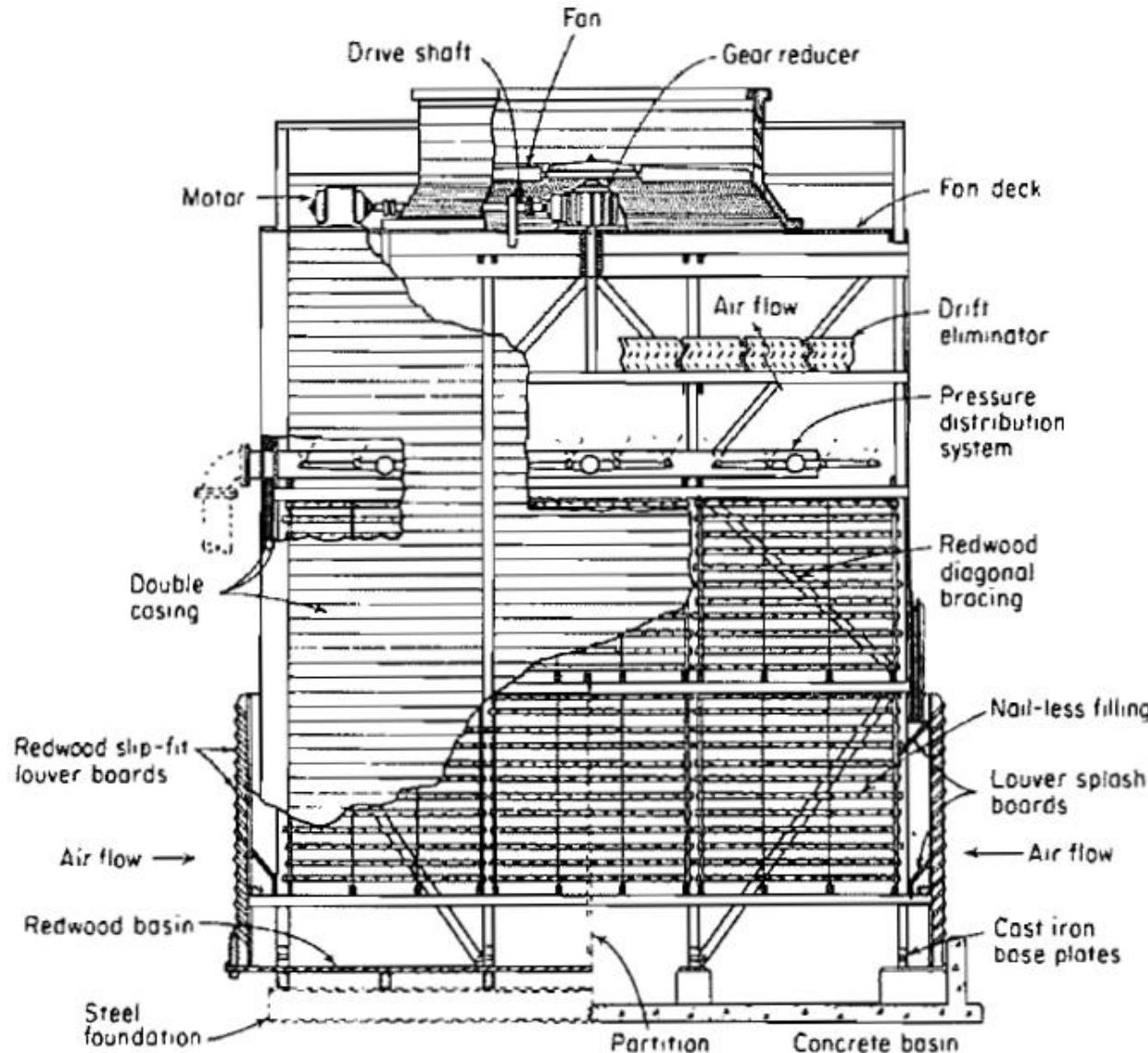


Légionnelles, conditions de prolifération :

- Eau entre 25 et 45°C
- Présence d'un biofilm et de tartre
- Présence de fer et zinc
- Présence d'amibes
- Eau stagnante

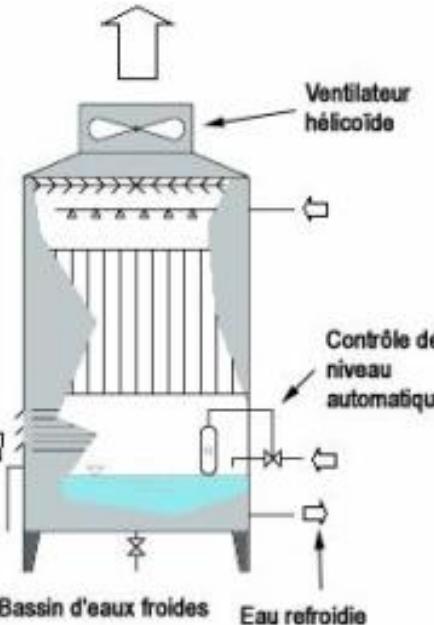
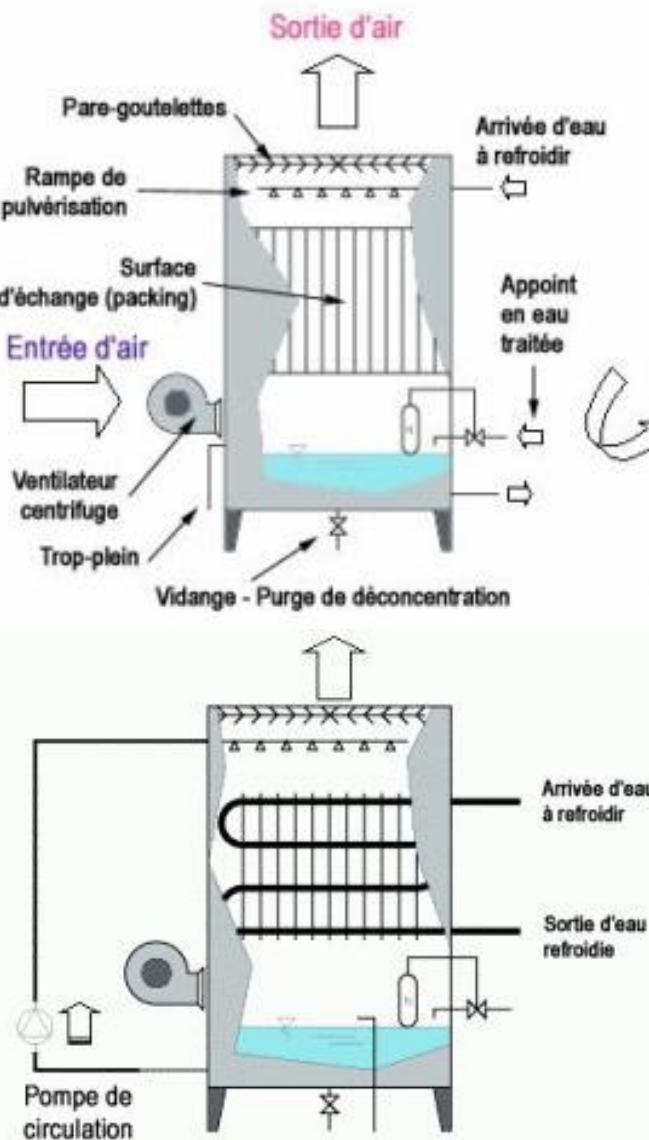
Destruction à partir de 60°C ou traitement chlore ou H₂O₂+Ag

Tour de refroidissement : technologie



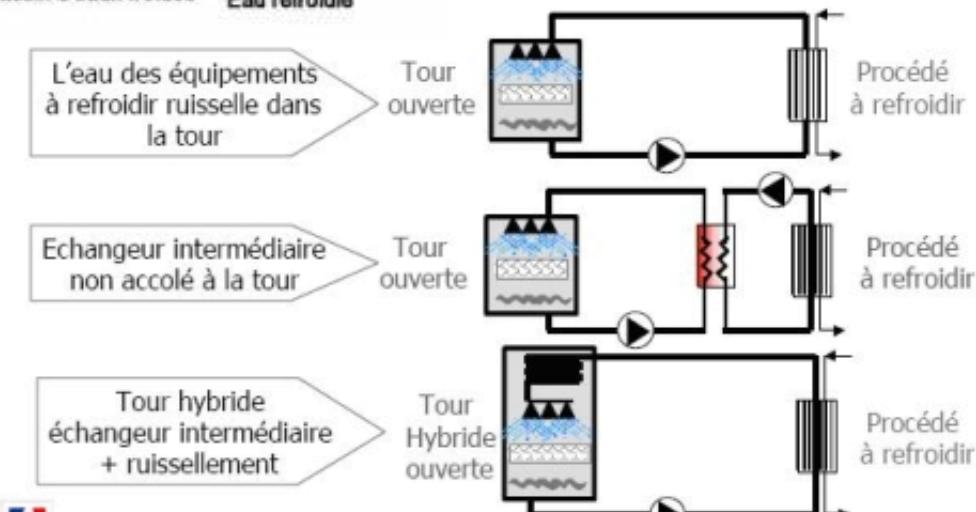
Induced-draft cooling tower. (*The Marley Co., Inc.*)

Tour de refroidissement en circuit ouvert contre courant Convection forcée



Circuit ouvert :
-Bonne surface d'échange
-Difficile à décontaminer

Circuit fermé :
-Mauvaises performances
-Volume à traiter réduit en cas de légionnelles

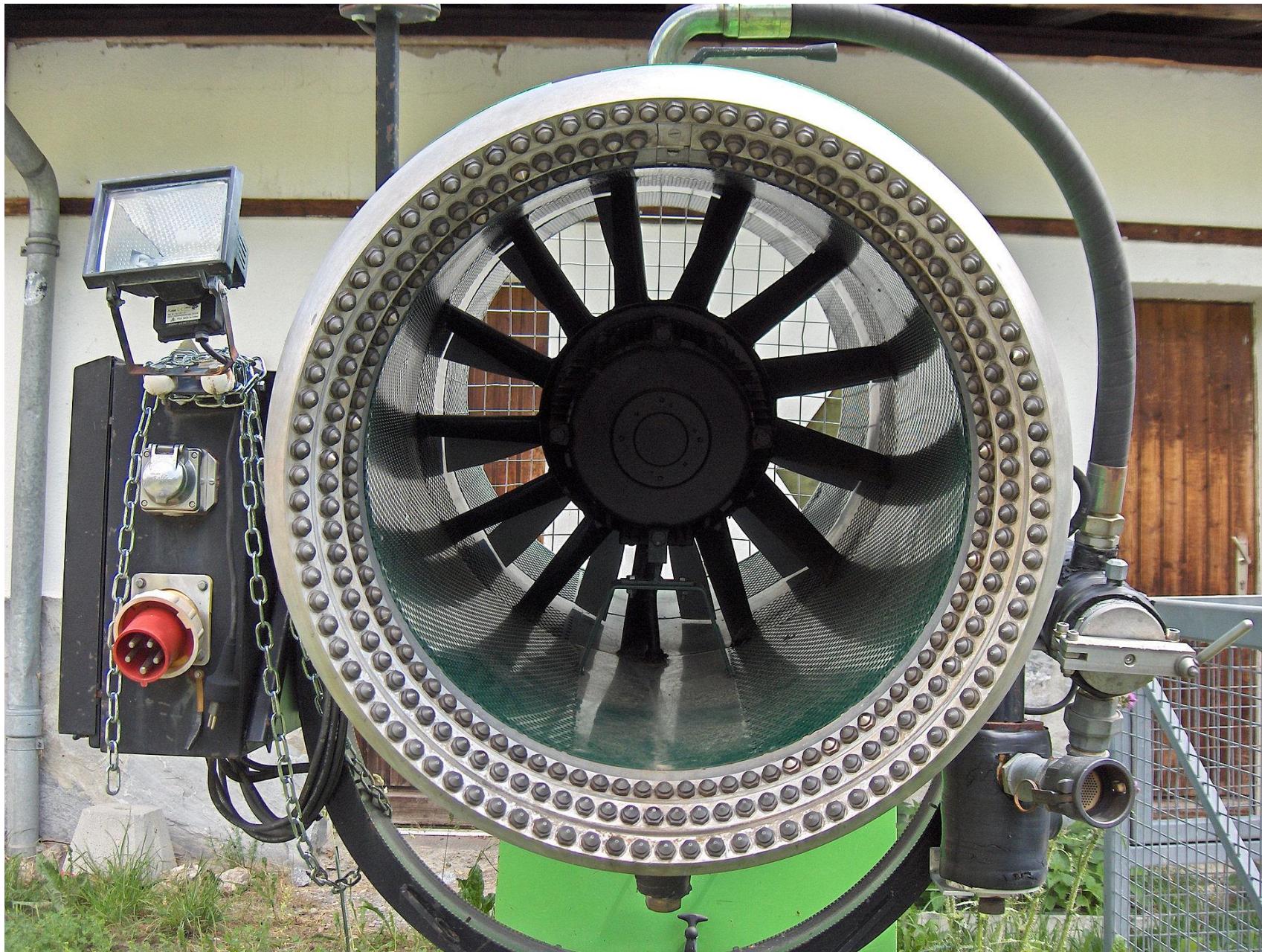


Réalisé par Climespace-M. Merchat pour le MEDD-février 2005

Système co-courant : canon à neige



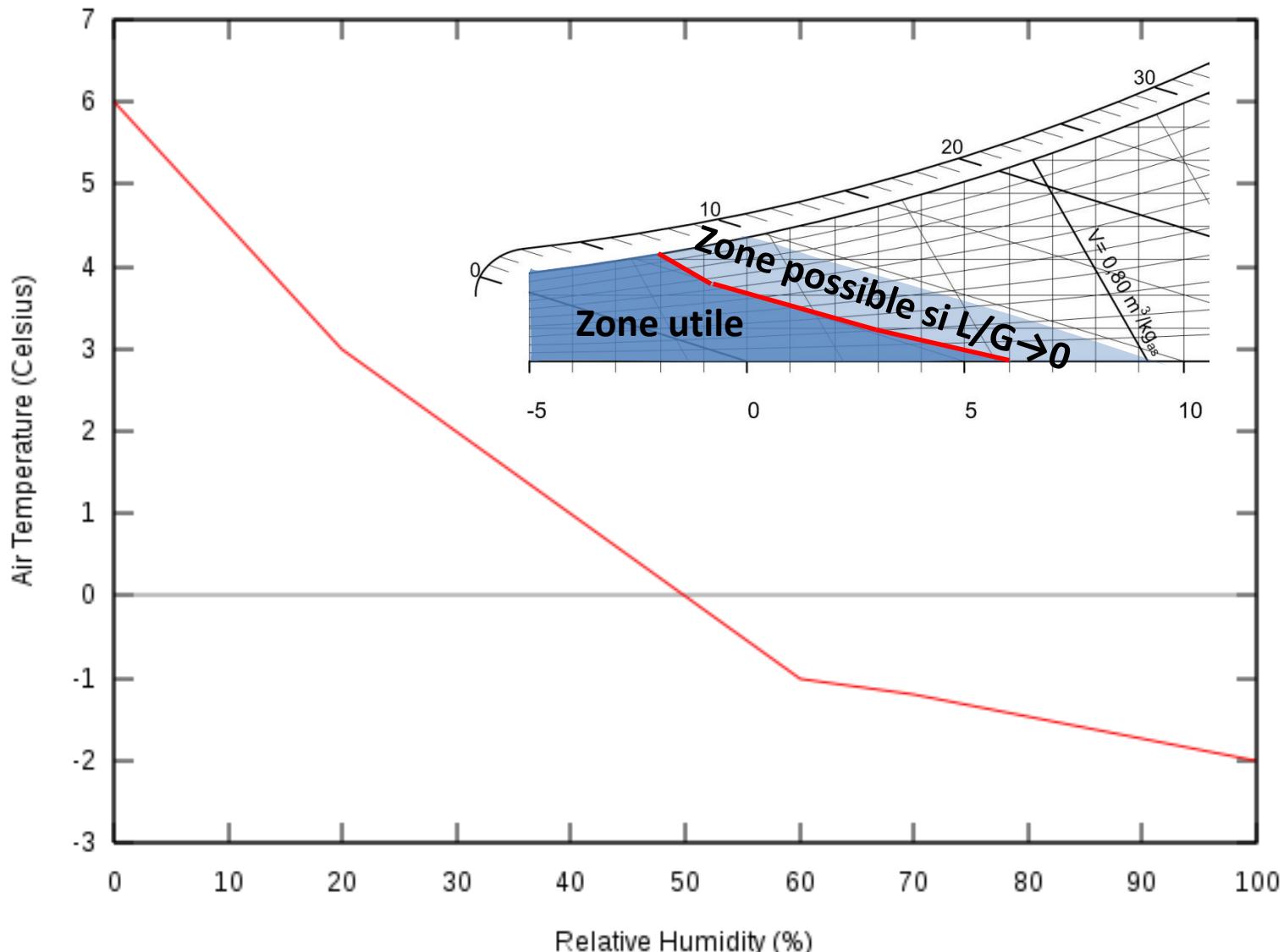
Cours Echangeurs de Matière – Air Humide



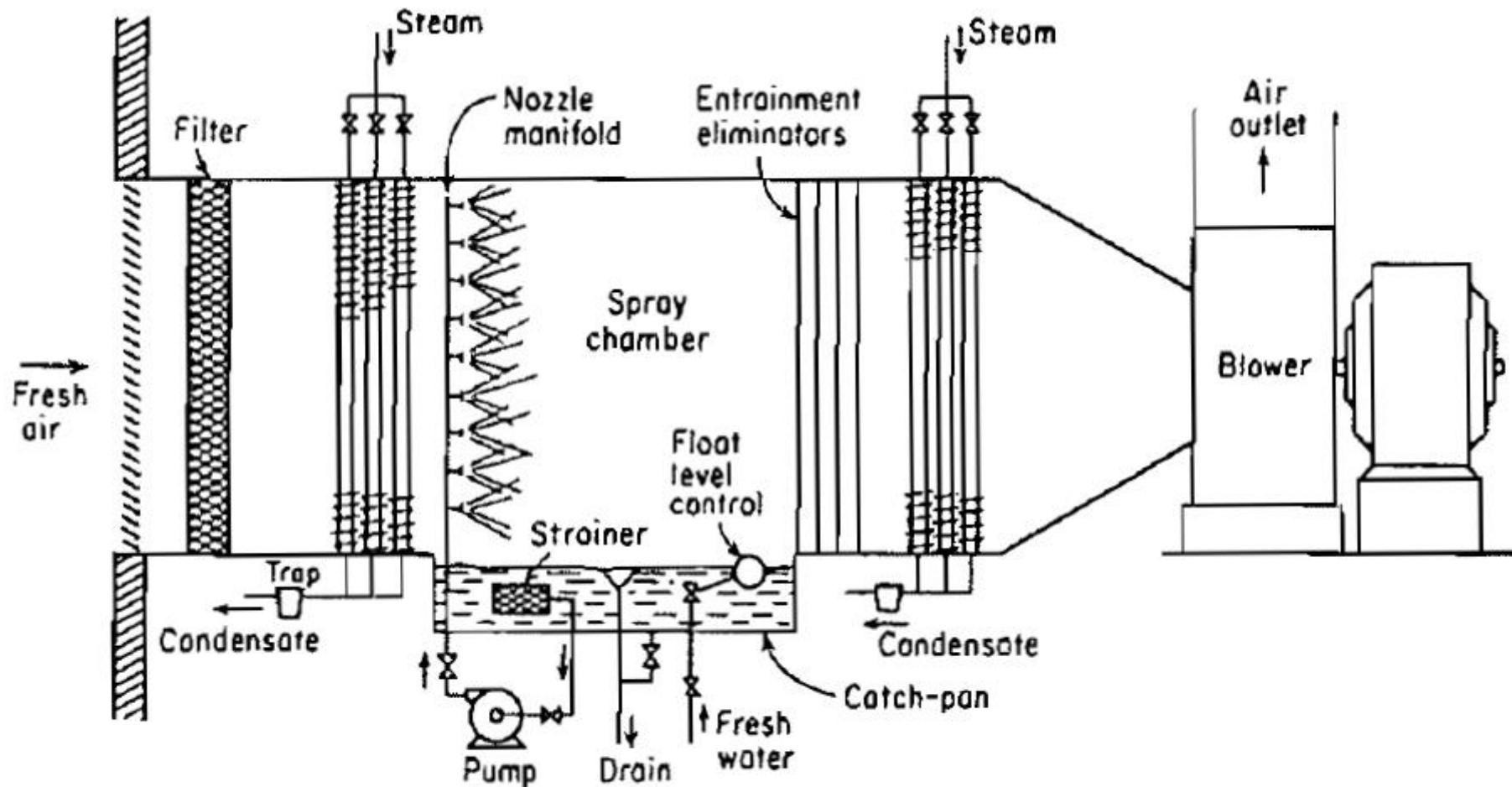
Cours Echangeurs de Matière – Air Humide

Canon à neige, régime de fonctionnement

Snow Making Curve



Système co-courant : humidificateur d'air



Schematic arrangement of a spray chamber.

Séchage des solides

Introduction - Généralités

Tout solide plongé dans un air humide verra son humidité s'équilibrer jusqu'à l'égalisation des potentiels chimiques de l'eau dans le gaz et le solide. C'est donc un équilibre thermodynamique qui s'établit.

Air à ω

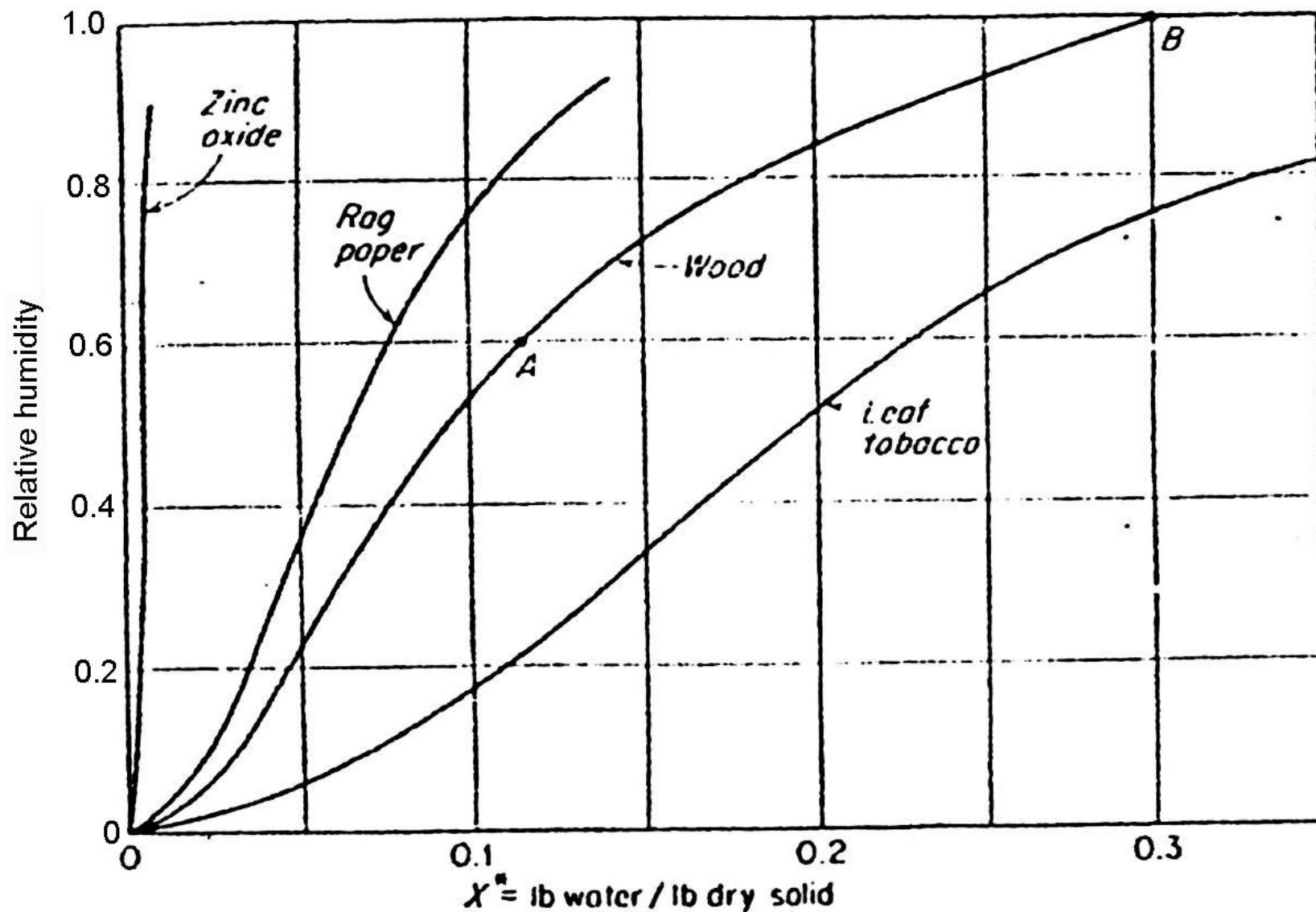
Solide en équilibre à $X \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{matière sèche}}$

En général, on trouve des relations donnant la teneur en eau d'une solide en fonction de l'humidité relative à température donnée ou de la pression partielle d'eau (humidité absolue). On distingue l'eau sous plusieurs formes dans le solide : **l'eau liée** qui est absorbée en volume, **l'eau non liée** qui est présente dans les pores sous forme aqueuse, et enfin **l'eau libre** qui forme un film à la surface du solide.

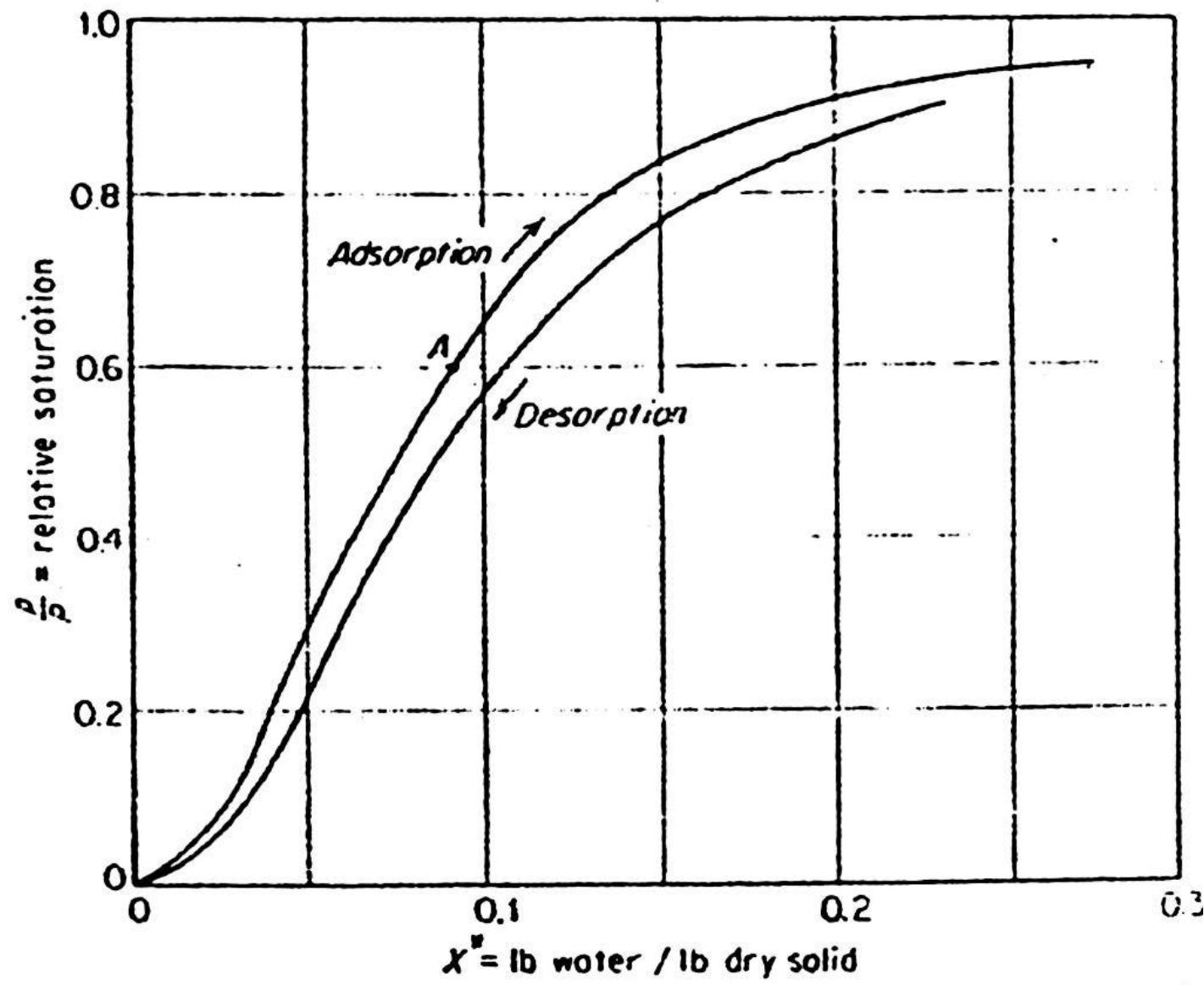
L'eau non liée et l'eau libre exercent une pression de vapeur saturante égale à l'eau liquide. L'eau liée a une pression de vapeur saturante inférieure, elle est donc difficile à enlever.

Eau libre

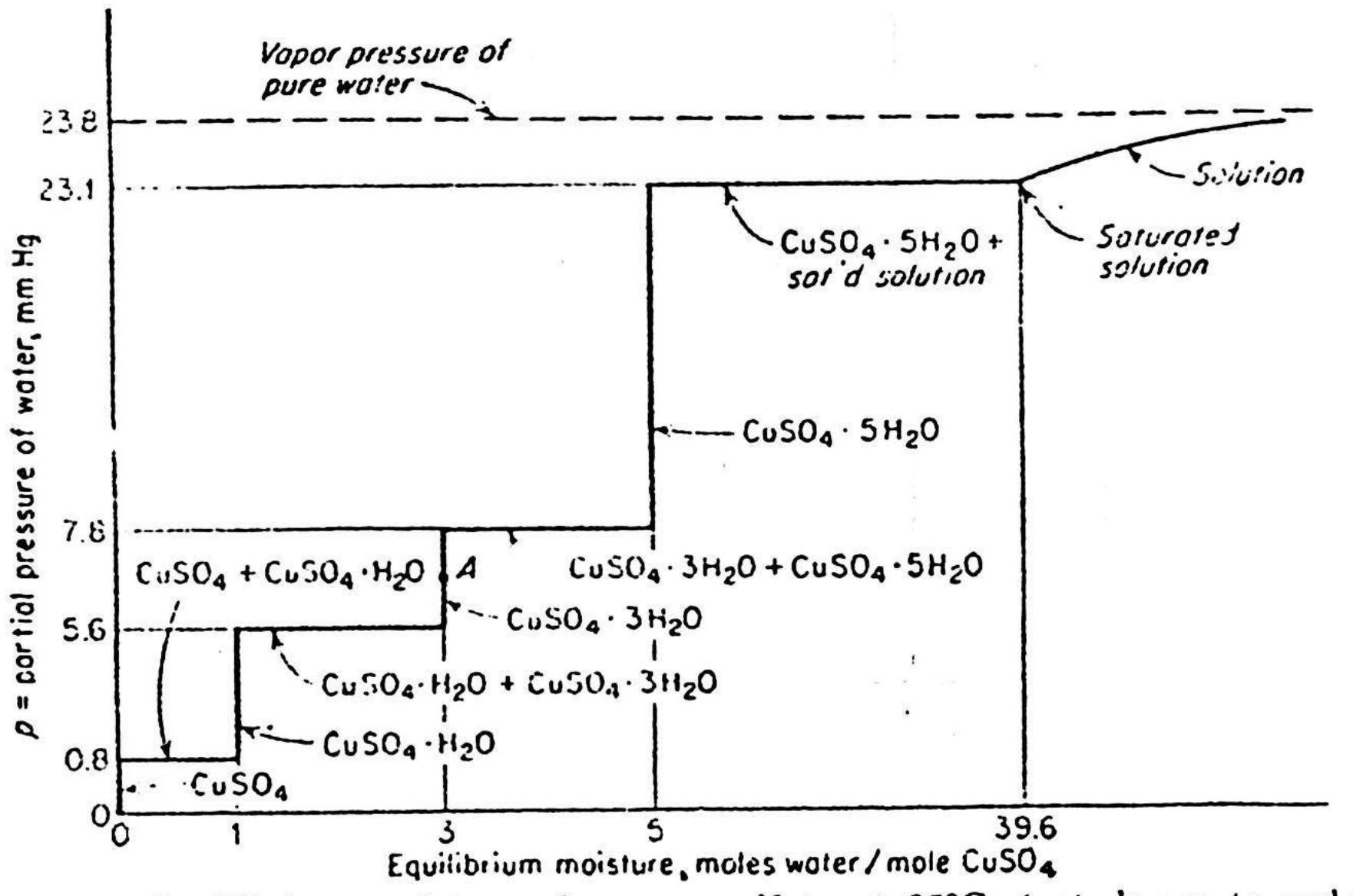




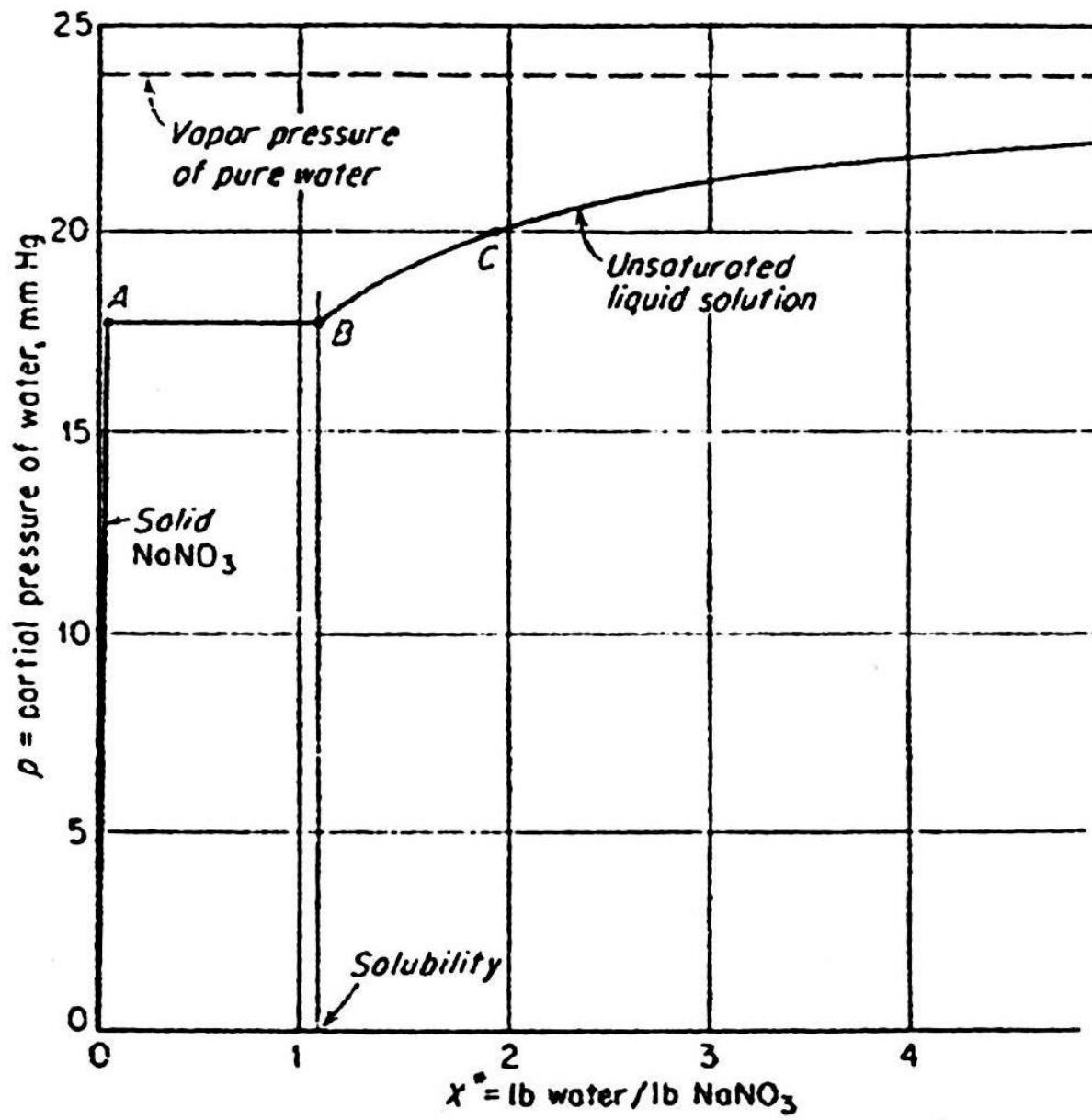
Equilibrium water content of some common solids at about 25°C. (From "International Critical Tables," vol. 2, pp. 322-325, with permission.)



Equilibrium water content of a sulfite pulp, showing hysteresis
[*Eng. Chem.*, 29, 169 (1937).]

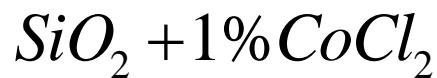


Equilibrium moisture of copper sulfate at 25°C. (not drawn to scale).



Equilibrium moisture content of sodium nitrate

Une application : absorbeurs d'humidité



Tests de séchage

On exprime la composition en eau par rapport à la masse de solide sec :

$$X = \frac{\text{masse eau}}{\text{masse solide sec}}$$

Et la compositions de l'air de la même manière :

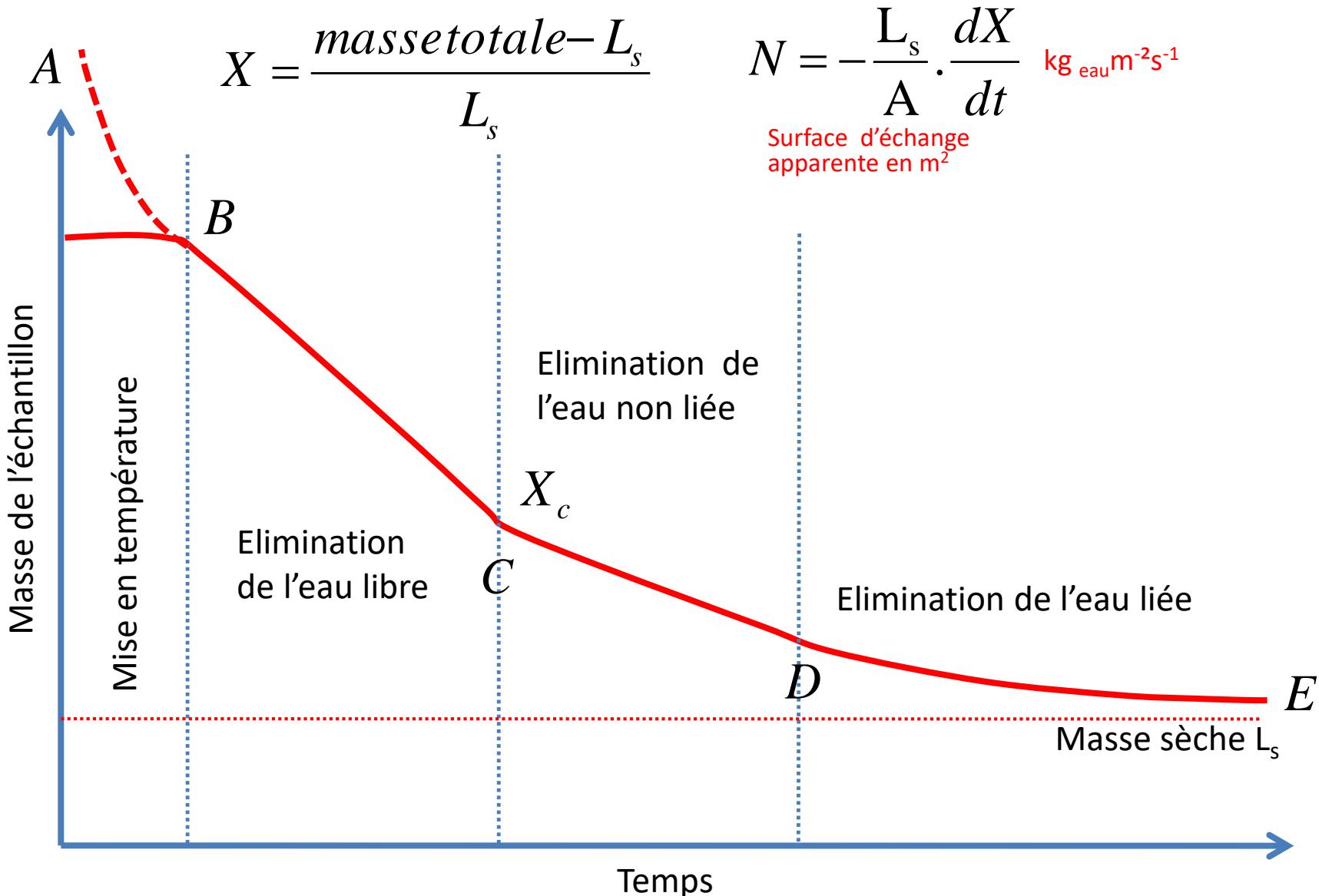
$$\omega = \frac{\text{masse eau}}{\text{masse air sec}}$$

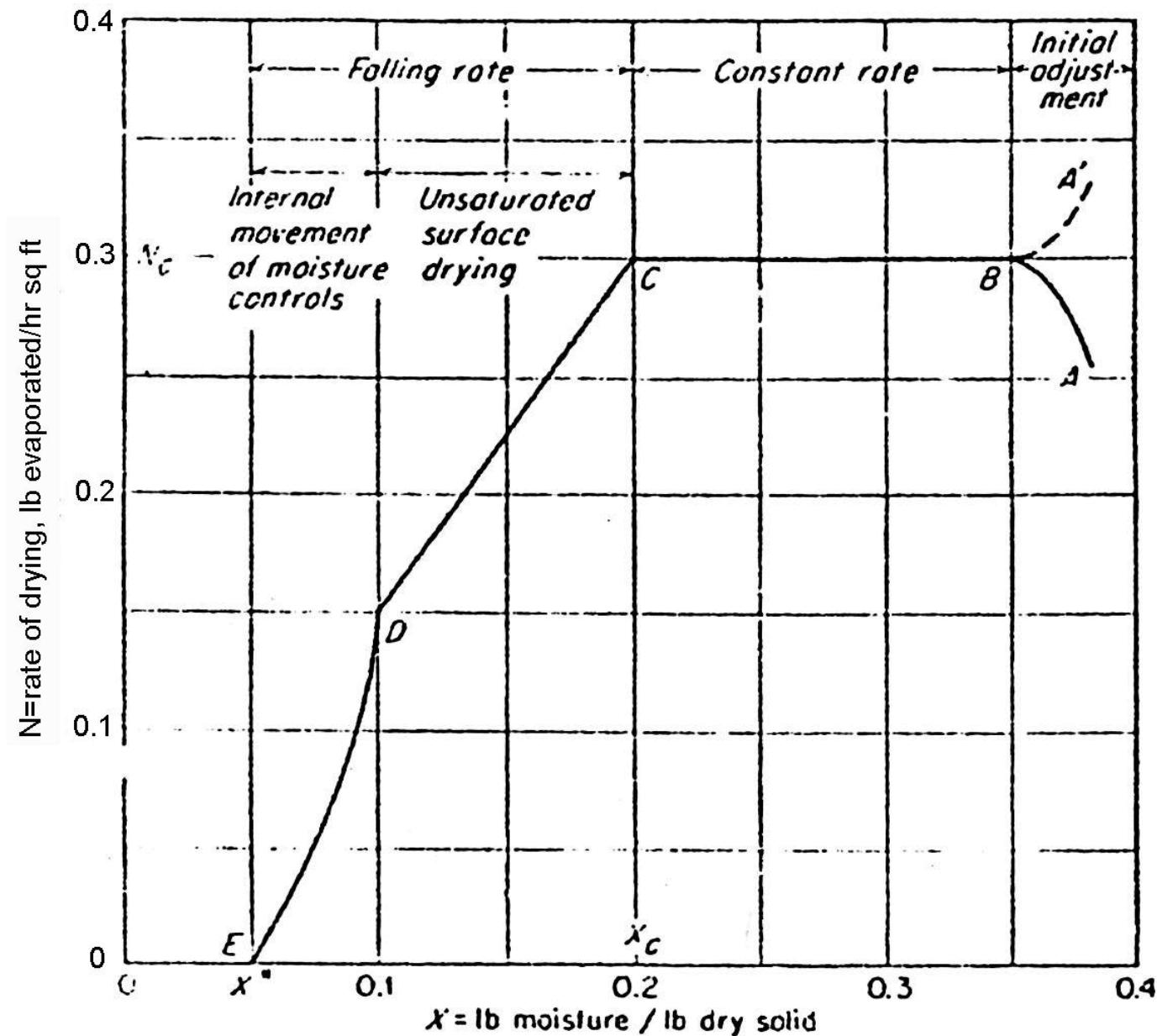
Pour sécher un solide, étant donnée la courbe d'équilibre et la présence d'eau libre, liée et non liée, il faut au préalable réaliser un essai de séchage. Pratiquement parlant, on peut par exemple placer l'échantillon dans une thermobalance sous un flux d'air contrôlé, et on suit l'évolution de la masse au cours du temps. On obtient alors une courbe de séchage :

$$N = \frac{\text{masse eau éliminée}}{\text{surface * temps}} = f(X)$$

Le slide suivant présente l'allure typique d'une courbe de séchage.

A partir de la masse de l'échantillon, de la masse de matière sèche et de la dérivée de la masse de l'échantillon on obtient :





Typical rate-of-drying curve, constant drying conditions.

On observe différents régimes d'évaporation en fonction de X :

-**Dans la zone AB** : le taux de séchage n'est pas constant à cause de la mise en température du solide qui est soit plus chaud, soit plus froid que sa température d'équilibre avec le gaz.

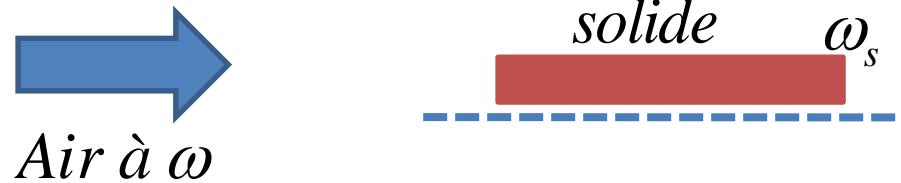
-**Dans la zone BC** : en début de séchage, on constate que le taux de séchage est constant dans le temps, on enlève alors l'eau libre. **La température à la surface du solide s'équilibre à la température de saturation adiabatique de l'air de séchage.** La vitesse d'évaporation s'exprime alors par :

$$N = k_{eau} (\omega_s - \omega)$$

-**Dans la zone CD** : L'eau non liée commence à s'évaporer à travers les pores du solide, la surface d'évaporation varie au cours du temps, bien que la pression de vapeur saturante de l'eau s'échappant du solide soit la même que celle de l'eau libre. La pente du taux d'évaporation est souvent proche d'une droite.

-**Dans la zone DE** : on sèche le solide en profondeur jusqu'à l'équilibre avec la courbe de saturation du solide dépendant de sa nature et de la pression partielle d'eau de l'air de séchage. La pente du taux d'évaporation est à priori non prévisible, car les phénomènes de transfert se complexifient.

Temps de séchage : solide dans un air à composition constante



$$N = -\frac{L_s}{A} \cdot \frac{dX}{dt} = k_{eau} (\omega_s - \omega)$$

Dans un premier temps (zone BC), N est une constante :

$$dt = -\frac{L_s}{A} \cdot \frac{dX}{N} \rightarrow \int_0^{\Delta t} dt = \frac{L_s}{A} \int_{X_C}^{X_B} \frac{dX}{N}$$

$$\Delta t = \frac{L_s}{AN} (X_B - X_C)$$

Dans un deuxième temps (zone CD), N est une variable dépendant de X :

$$N = aX + b \quad (\text{Par exemple})$$

$$\Delta t_2 = \int_0^{\Delta t} dt = \frac{L_s}{A} \int_{X_D}^{X_C} \frac{dX}{aX + b} = \frac{L_s}{aA} \ln \left(\frac{aX_C + b}{aX_D + b} \right) \rightarrow N_C$$

$$Et \ a = \frac{N_C - N_D}{X_C - X_D}$$

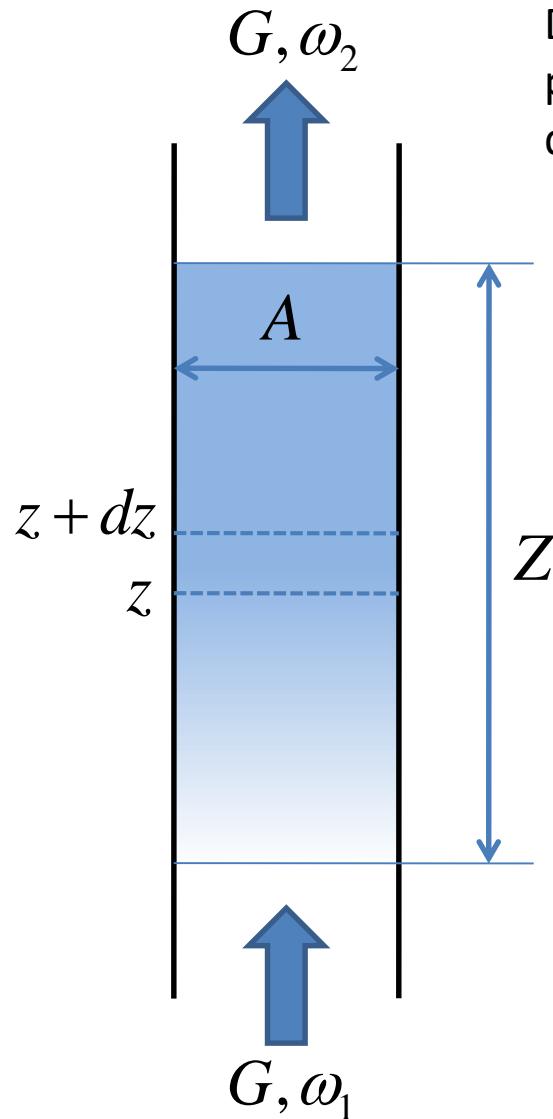
$$\Delta t_2 = \frac{L_s}{A} \frac{X_C - X_D}{N_C - N_D} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right)$$

Si tout CDE peut être assimilé à une droite :

$$N = \frac{N_C(X - X^*)}{X_C - X^*}$$

$$\Delta t_2 = \frac{L_s}{N_C A} (X_C - X^*) \ln \left(\frac{X_C - X^*}{X_E - X^*} \right)$$

Sécheur à lit traversé



Dans ce type de sécheur, l'échange se fait sur une petite portion du lit qui se déplace avec le temps, l'air sortant quasiment saturé du lit de matières solides à sécher.

$$N_{\max} = \frac{G}{A} (\omega_s - \omega_l)$$

En réalité, on a plutôt :

$$N = \frac{G}{A} (\omega_2 - \omega_1) \text{ avec } \omega_2 \leq \omega_s$$

Sur une tranche dz :

$$dN = \frac{G}{A} d\omega = k_{eau} (\omega_s - \omega) a_i dz$$

$$dz = \frac{G / A}{k_{eau} a_i} \frac{d\omega}{\omega_s - \omega}$$

$$dz = \frac{G/A}{k_{eau} a_i} \frac{d\omega}{\omega_s - \omega} \quad Z = NUT_G HUT_G$$

$$HUT_G = \frac{G/A}{k_{eau} a_i} \quad NUT_G = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{\omega_s - \omega}$$

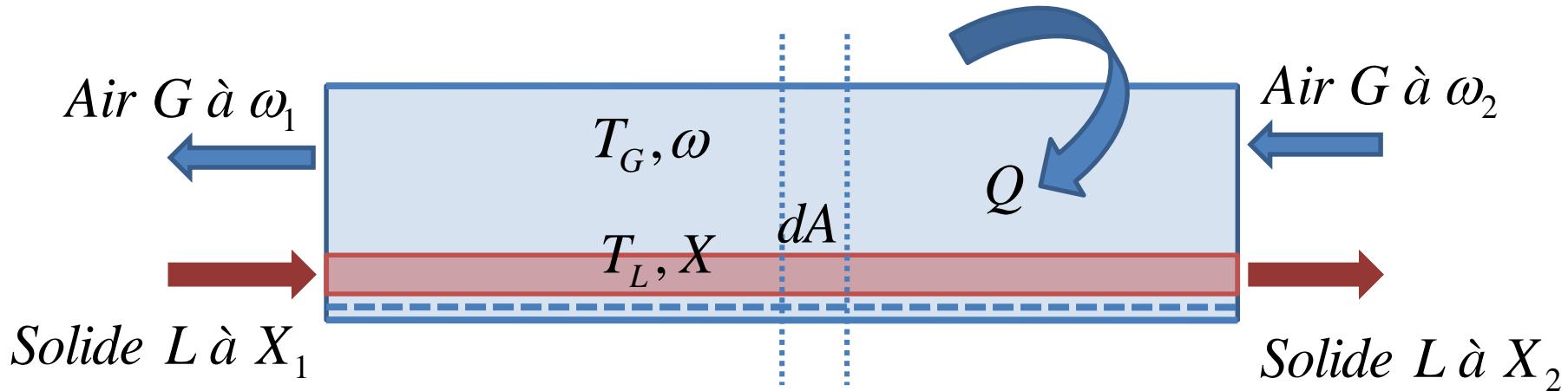
Ici, ω_s est constant et correspond à température de saturation adiabatique du solide à sécher, donc en régime permanent :

$$NUT_G = \ln \left(\frac{\omega_s - \omega_1}{\omega_s - \omega_2} \right)$$

$$\frac{N}{N_{\max}} = 1 - \exp(-NUT_G)$$

Le bilan ne donne ici que le taux de séchage de l'eau libre et non liée lorsque le lit de solide est saturé en eau. En réalité il existe une évolution temporelle du lit qui n'est pas prise en compte ici -> les méthodes numériques sont très adaptées à la résolution de ce type de problème.

Sécheur continu contre courant



$$\text{Bilan global eau : } LX_1 - LX_2 = G\omega_1 - G\omega_2$$

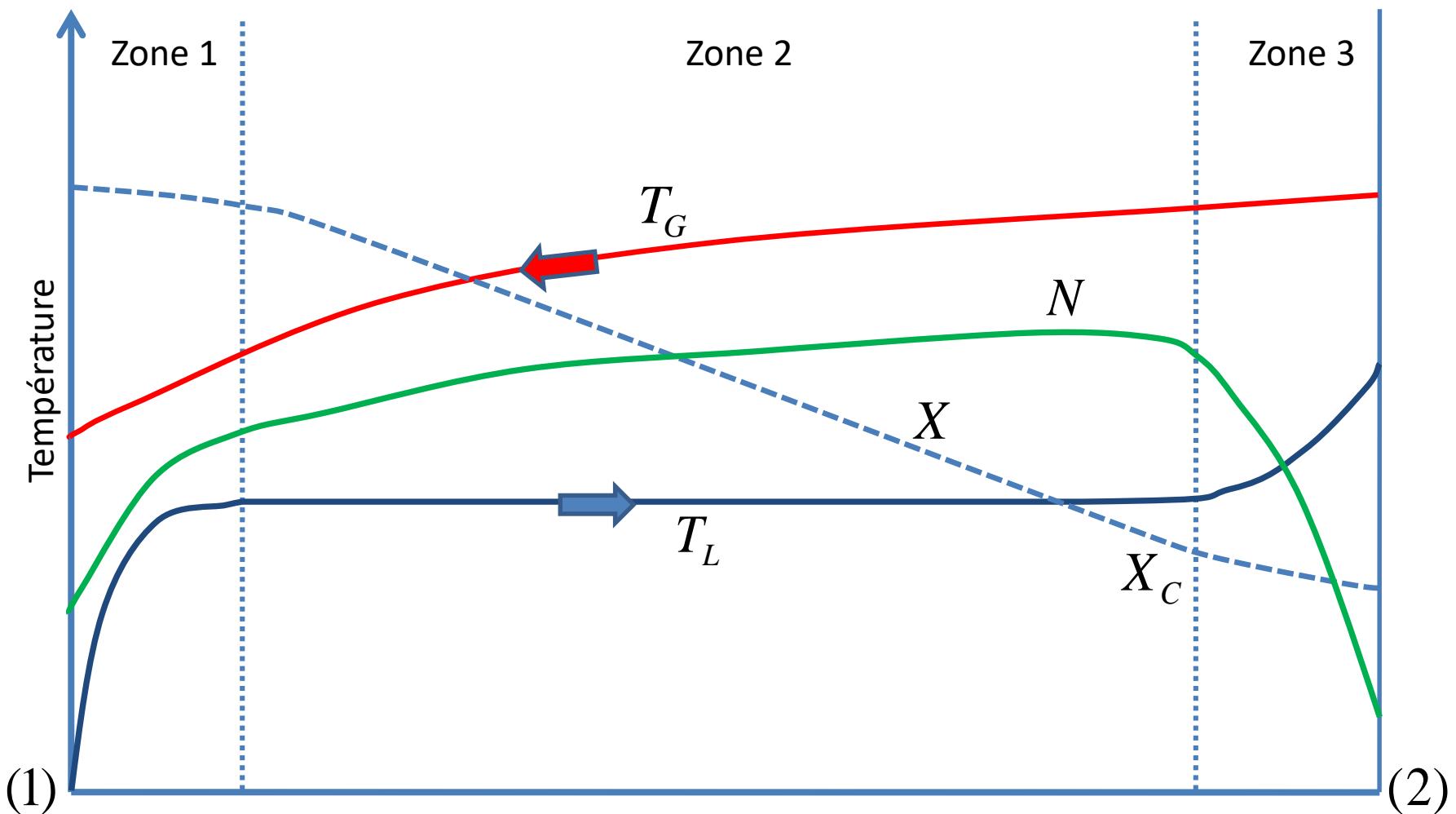
$$\text{Soit : } \frac{L}{G} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{X_1 - X_2} = \frac{\omega_1 - \omega}{X_1 - X} = cste$$

$$\text{Enthalpie du gaz : } H_G = \left(C_{p \text{ air}} + \omega C_{p \text{ vapeur eau}} \right) \left(T_G - T_{ref} \right) + \omega \Delta H_{vap}(T_{ref})$$

$$\text{Enthalpie du solide : } H_L = \left(C_{p \text{ solide}} + X C_{p \text{ eau liquide}} \right) \left(T_G - T_{ref} \right) + X \Delta H_{mouillage}(T_{ref})$$

Bilan enthalpique : $LH_{L1} + GH_{G2} = LH_{L2} + GH_{G1} + Q$

Cas d'un séchage adiabatique



Zone 1 : Préchauffage du solide jusqu'à égalisation des flux de chaleur vers le solide et des flux de matière vers le gaz. Le séchage est faible dans cette zone.

Zone 2 : Température du solide constante et égale à la température de saturation adiabatique, tant que l'eau est libre et non liée. Attention, l'humidité et la température varient dans cette zone. Le taux d'évaporation reste à peu près proportionnel à l'écart entre la température du gaz et la température du solide.

Zone 3 : Elimination de l'eau liée, le solide n'a presque plus d'eau à restituer au gaz, sa température augmente asymptotiquement jusqu'à celle du gaz.

Si l'on considère uniquement la zone 2 -> Bilan différentiel dans la zone 2 :

$$Gd\omega = -LdX \quad dA = Pdz$$

surface d'échange sur dz

$$dN = -LdX = Gd\omega = k_{eau} (\omega_s - \omega) Pdz$$

$$\frac{G}{Pdzk_{eau}} = \frac{\omega_s - \omega}{d\omega} \longrightarrow \frac{Pk_{eau}}{G} dz = \frac{d\omega}{\omega_s - \omega}$$

Sécheur continu

Soit :
$$\frac{Pk_{eau}}{G} Z = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{d\omega}{\omega_s - \omega}$$

$$Z = \frac{G}{Pk_{eau}} \ln \left(\frac{\omega_s - \omega_2}{\omega_s - \omega_1} \right) \quad HUT_G = \frac{G}{Pk_{eau}} \quad NUT_G = \ln \left(\frac{\omega_s - \omega_2}{\omega_s - \omega_1} \right)$$

$$\frac{\omega_s - \omega_1}{\omega_s - \omega_2} = \exp \left(-\frac{Z}{HUT_G} \right) = \exp \left(-\frac{Sk_{eau}}{G} \right)$$

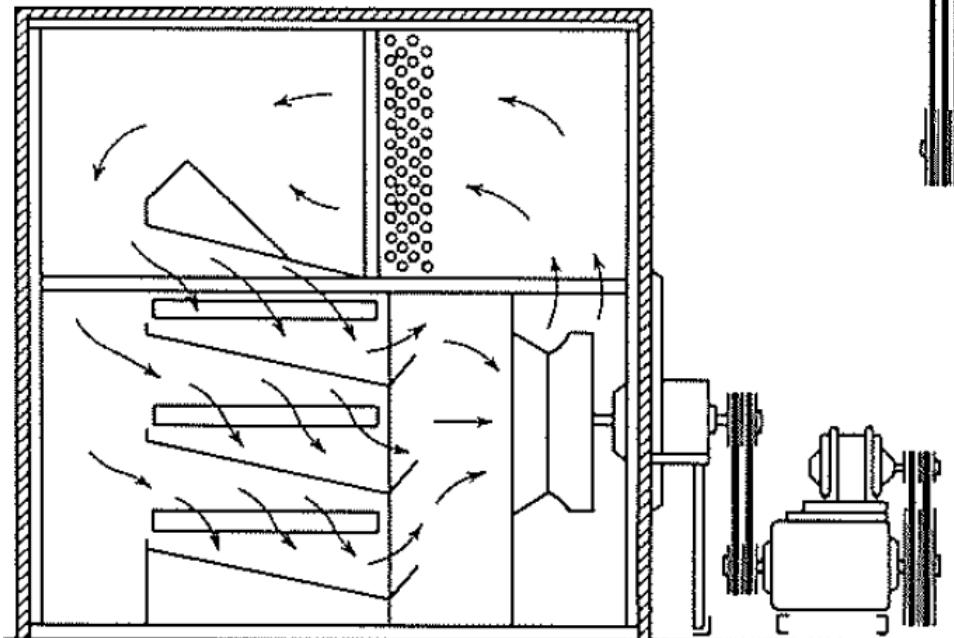
Bilan global : $L(X_1 - X_2) = G(\omega_1 - \omega_2) \longrightarrow X_1 - X_2 = \frac{G}{L}(\omega_1 - \omega_2)$

On se fixe un débit de solide à sécher puis on remonte à la surface nécessaire.

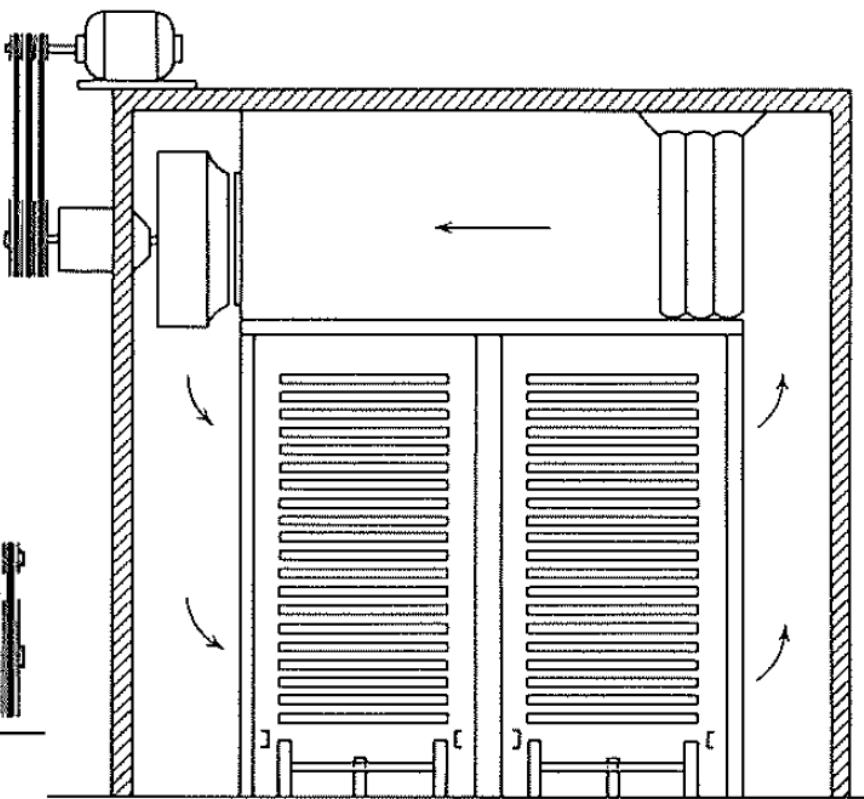
Attention à l'unité du coefficient de transfert de matière :

$$m \xleftarrow{HUT_G} \frac{G}{Pk_{eau}} \xrightarrow{kg_{air\ sec}s^{-1}} kg_{air\ sec}m^{-2}s^{-1}$$

Sécheurs : technologie

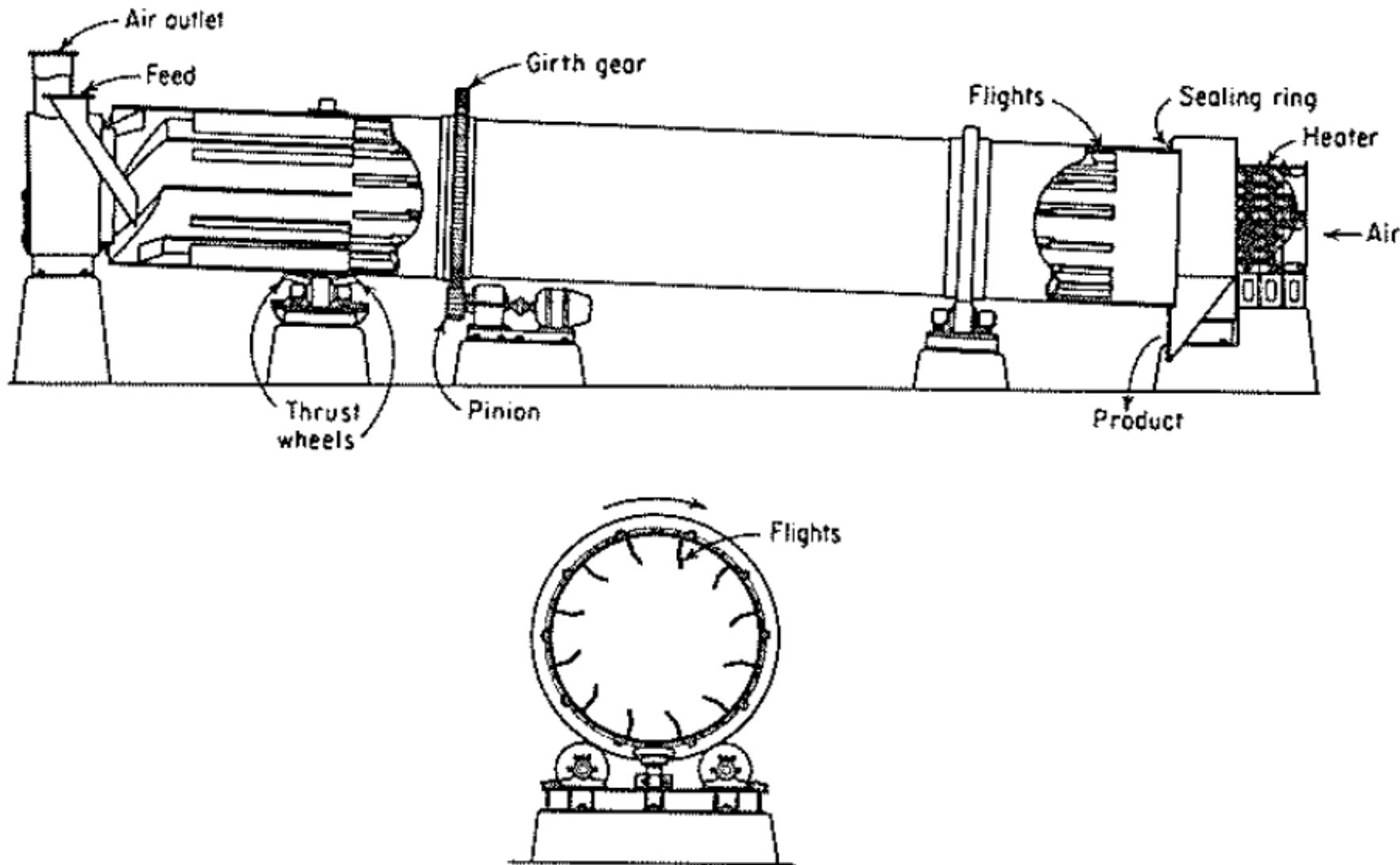


Through-circulation drier. (*Proctor and Schwartz, Inc.*)



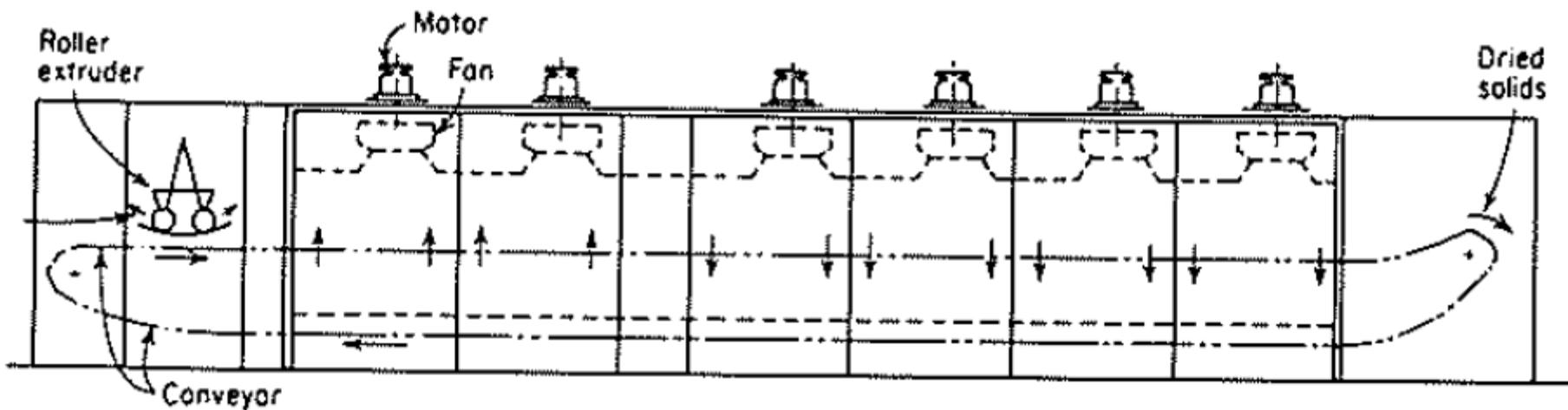
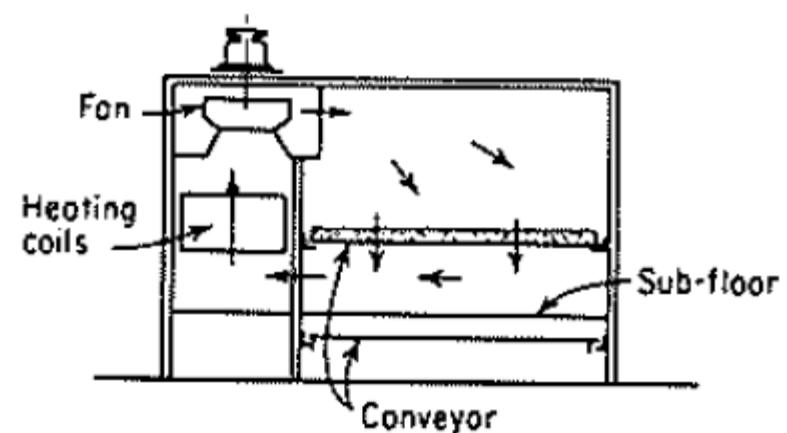
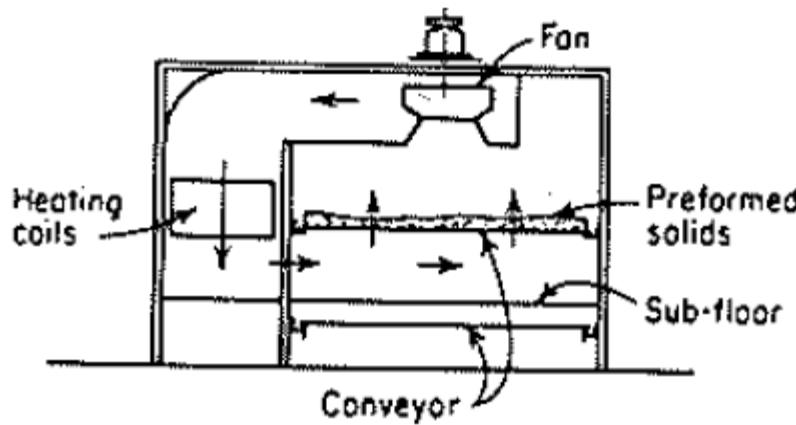
Two-truck drier. (*Proctor and Schwartz, Inc.*)

Sécheurs : technologie



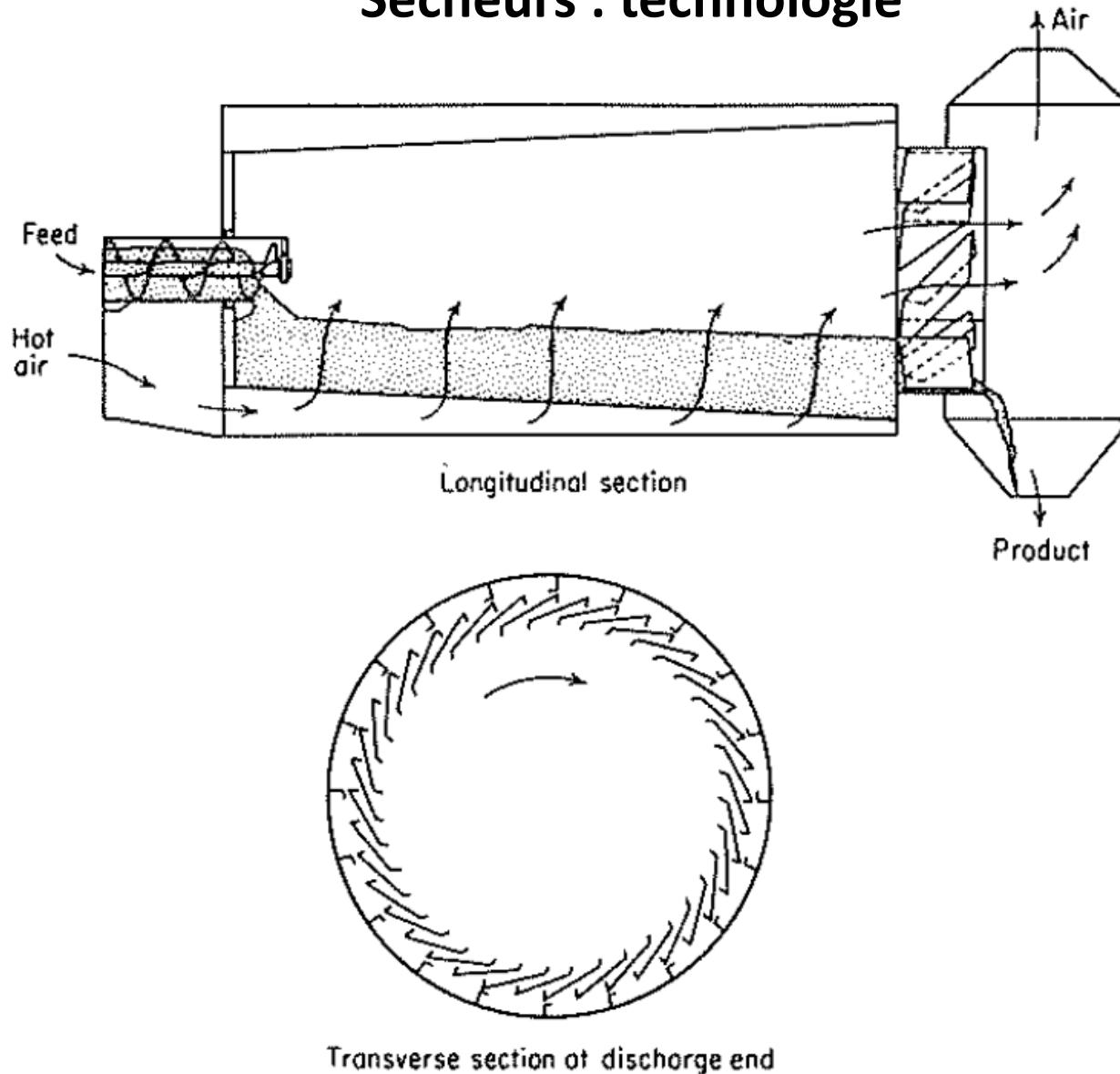
Ruggles-Coles XW hot-air drier. (*Hardinge Co., Inc.*)

Sécheurs : technologie



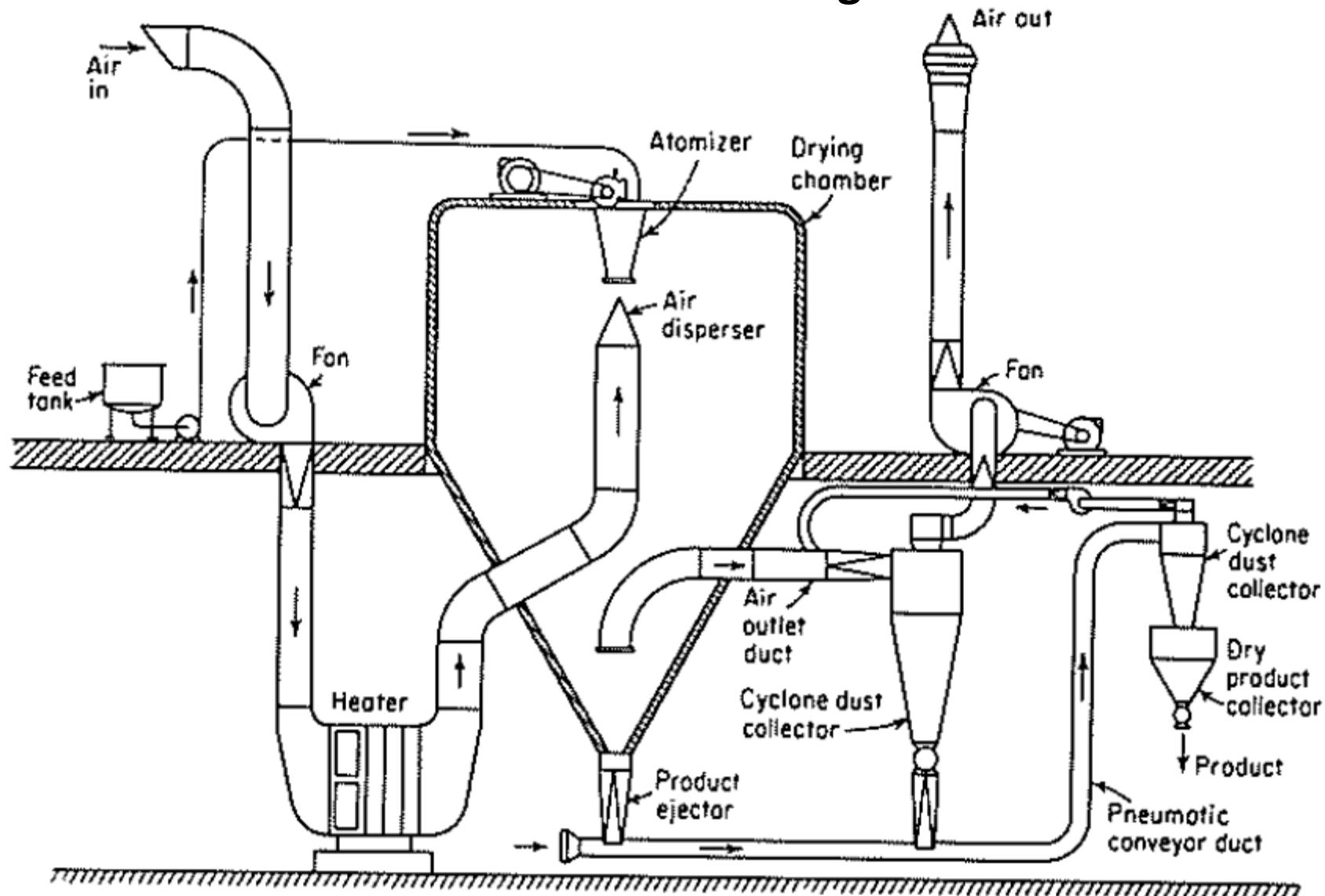
Continuous through-circulation (single-conveyor) drier with roller extruder.

Sécheurs : technologie



Continuous through-circulation rotary drier (Roto-Louvre). (*Link-Belt Co.*)

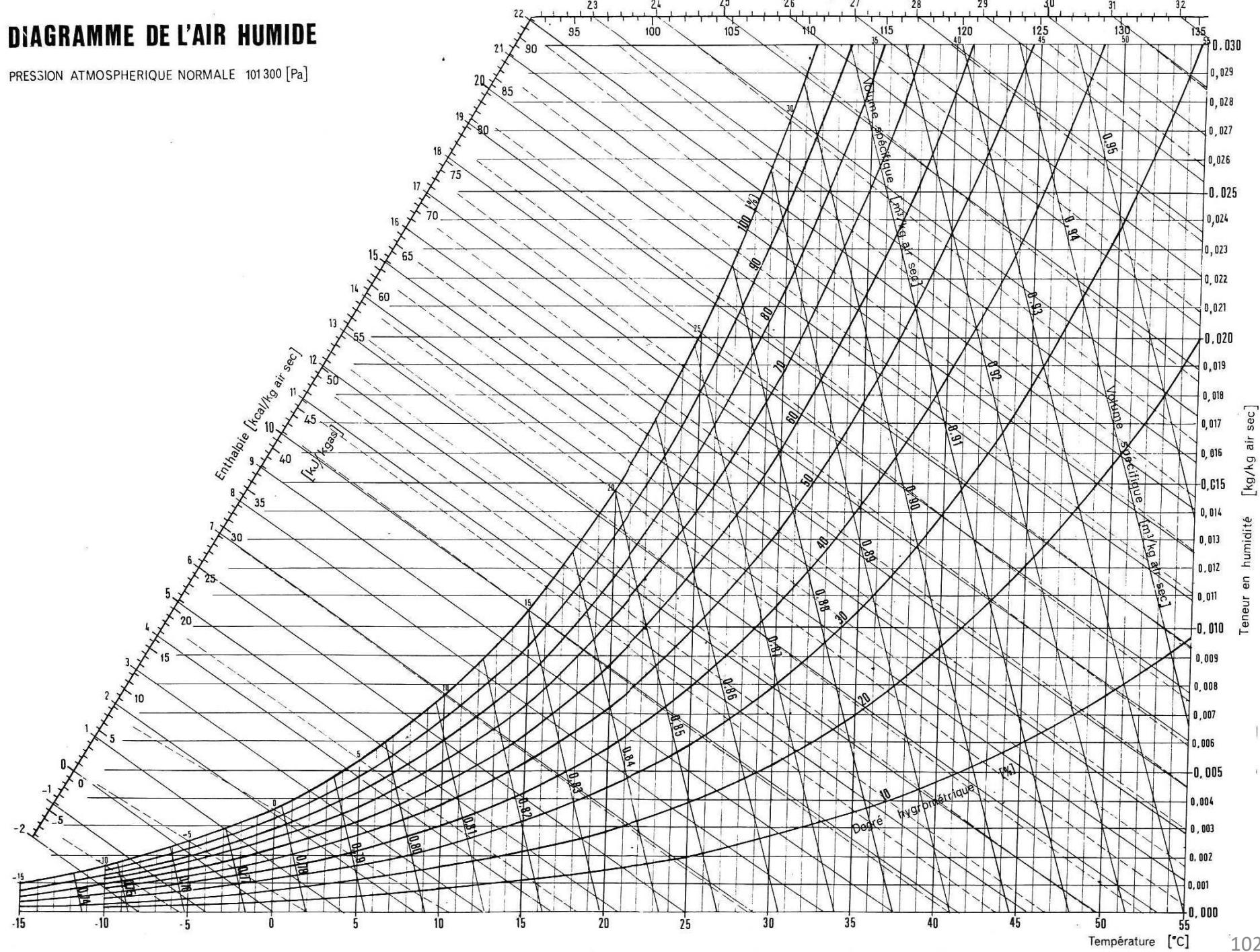
Sécheurs : technologie



Spray drier. (*Nichols Engineering and Research Corp.*)

DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

PRESSION ATMOSPHERIQUE NORMALE 101300 [Pa]



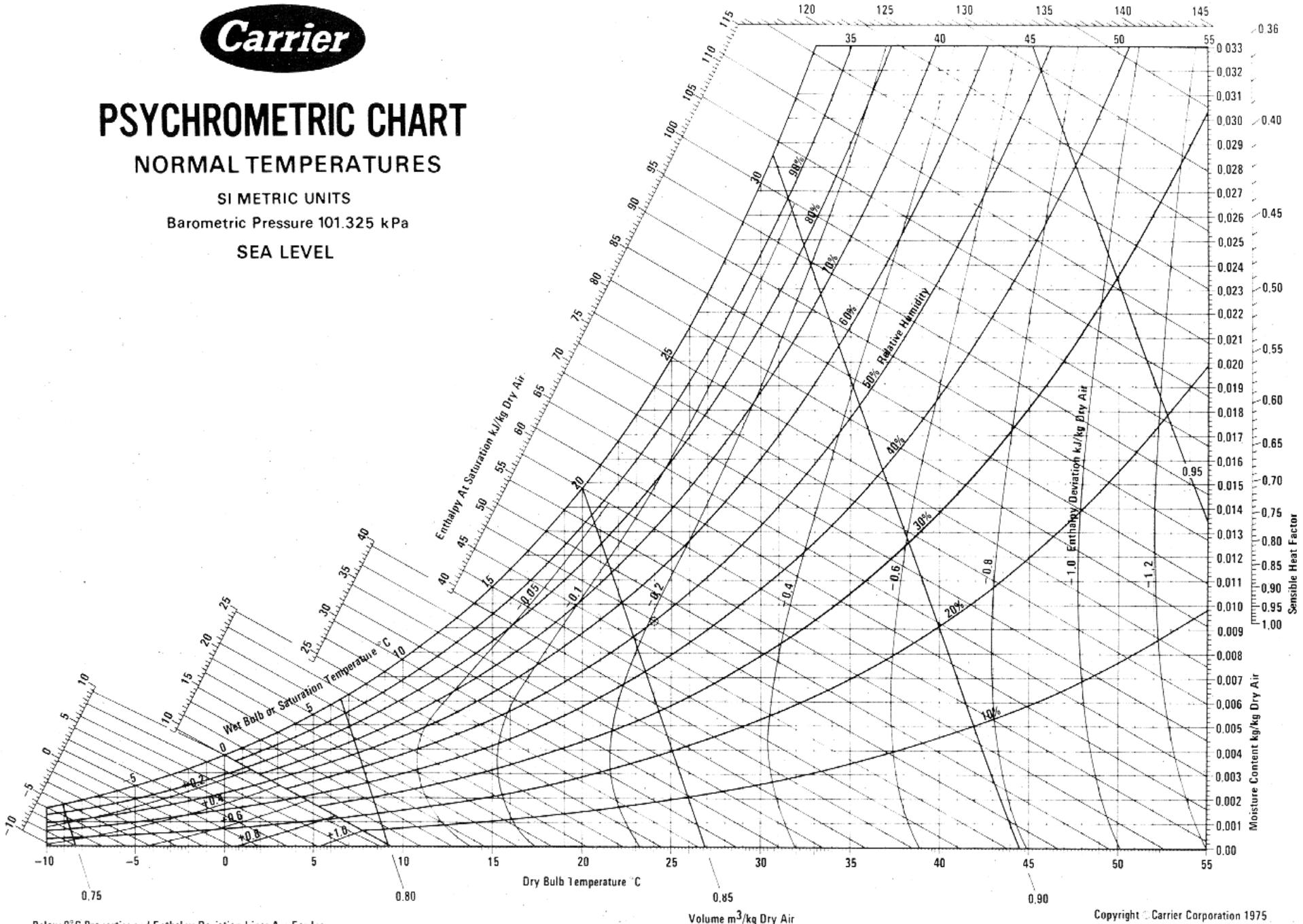
PSYCHROMETRIC CHART

NORMAL TEMPERATURES

SI METRIC UNITS

Barometric Pressure 101.325 kPa

SEA LEVEL



Below 0°C Properties and Enthalpy Deviation Lines Are For Ice

Copyright © Carrier Corporation 1975
Cat. No. 794-002 Printed in U.S.A.