

Matière 1:

Opération unitaire II: (humidification, Séchage, Evaporation et Cristallisation)

Contenu de la matière :

Chapitre I : Humidification

Principe, applications, grandeurs humides, équipement utilisés (tour de refroidissement, aéroréfrigérant), diagramme de l'air humide, thermomètre humide, mélange d'air humide (calcul des grandeurs humide du mélange, diagramme de mollier (enthalpie, humidité absolue), dimensionnement d'une tour de refroidissement.

Chapitre II : Séchage

Généralités, différents types de sècheurs, choix de sècheurs, mode de séchage (continu, discontinu, contre -courant, co-courant, par convection, conduction etc...), mécanisme de séchage, bilan matière et enthalpie au niveau d'un sécheur, calcul de la vitesse et la durée de séchage.

Chapitre III : Evaporation

Introduction, facteurs principaux influençant l'évaporation, bilan thermique et matière au niveau de l'évaporateur (simplifié), différents types d'évaporateurs et différentes circulations, calcul de la surface d'échange (évaporateur simplifié ou à multiples effets), comparaison entre évaporation à multiples effets à contre courant et à co-courant, différents types de procédés d'évaporation (système à compression, éjecto-compression, pompe à chaleur, à absorption), dispositifs annexes (condenseurs, séparateur gaz-liquide).

Chapitre III : Cristallisation

Quelques aspects fondamentaux, les différentes étapes de la cristallisation, effet des impuretés sur la formation des cristaux, les réacteurs de cristallisation (batch et continue), adsorption d'un soluté en phase liquide dans une tour à lit fixe (percolation).

Chapitre I : Air Humide

AIR HUMIDE : RAPPELS ET DEFINITIONS

INTRODUCTION

Nous allons considérer l'air humide comme un mélange de gaz parfaits et nous utilisons donc la loi de Dalton [1] qui nous dit que « la pression, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie d'un mélange de gaz parfaits sont respectivement égales à la somme des pressions partielles, des énergies internes partielles, des enthalpies partielles et des entropies partielles qu'auraient les gaz constituants s'ils occupaient seuls le volume total à la température du mélange. » soit :

$$P = P_{as} + P_v \quad [1]$$

$$H = H_{as} + H_v \text{ avec } H_{as} = m_{as} h_{as} \text{ et } H_v = m_v h_v \quad [2]$$

où P_{as} est la pression partielle d'air sec et P_v la pression partielle de vapeur d'eau. De même, H_{as} est l'enthalpie de l'air sec seul et H_v est l'enthalpie de la vapeur d'eau seule. Ces deux grandeurs sont données en fonction des enthalpies spécifiques massiques (h_v et h_{as}) des corps purs.

Appliquant la loi des gaz parfaits [1, 2] pour chacun des deux gaz à la même température T contenus dans un seul volume V , on obtient :

$$\begin{cases} P_{as} V = m_{as} \frac{R}{M_{as}} T = n_{as} RT \\ P_v V = m_v \frac{R}{M_v} T = n_v RT \end{cases} \quad [3]$$

La masse d'un volume gazeux est égale à la somme des masses des deux constituants et s'exprime en fonction de l'humidité spécifique ω défini comme suit :

$$m = m_{as} + m_v = m_{as} \left(1 + \frac{m_v}{m_{as}}\right) = m_{as} (1 + \omega) \quad [4]$$

avec $\omega = \frac{m_v}{m_{as}}$ en kg d'eau/kg d'air sec

ω peut encore s'exprimer en fonction du rapport des deux pressions partielles selon :

$$\begin{cases} \frac{P_v}{P_{as}} = \frac{m_v}{m_{as}} \frac{M_{as}}{M_v} = \frac{1}{0,62198} \frac{m_v}{m_{as}} = \frac{\omega}{0,62198} \approx \frac{\omega}{0,622} \\ \text{avec } M_{as} \approx 28,9644 \text{ g.mol}^{-1}; M_v = 18,0153 \text{ g.mol}^{-1}; \frac{M_v}{M_{as}} = \frac{1}{0,62198} \\ \omega = 0,622 \frac{P - P_{as}}{P_{as}} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \end{cases} \quad [5]$$

I Calcul de l'enthalpie du mélange :

Nous savons que pour un gaz parfait, l'enthalpie ne dépend que de la température, soit :

$$dh = C_p dT$$

de plus, si l'on suppose que la capacité calorifique à pression constante C_p est indépendant de la température ($C_p = C_{te}$), on peut écrire, pour l'enthalpie de l'air sec :

$$h_{as} = C_{p_{as}} (T - 273,15) = C_{p_{as}} t$$

soit : $h_{as} = 1,006 t$ avec h_{as} en kJ/kg.

où l'on a pris la température de 273.15K comme température de référence à laquelle l'enthalpie de l'air sec est nulle et où l'on définit $t=T-273.15$, c'est à dire que t représente la température en degrés Celsius.

Une démarche similaire est suivie pour la vapeur d'eau, supposée être un gaz parfait, mais une différence importante est introduite pour l'origine de l'enthalpie. Au lieu de prendre comme origine de l'enthalpie à 0°C, l'enthalpie de la vapeur d'eau c'est l'enthalpie de l'eau liquide que l'on prend comme référence. Dans ces conditions, on a, pour la vapeur d'eau, considérée comme un gaz parfait :

$$\begin{cases} h_v = C_{p_v} (T - 273.15) + h_v|_{T=273.15} \\ h_v|_{T=273.15} = h_{liq}|_{T=273.15} + h_v|_{T=273.15} - h_{liq}|_{T=273.15} = L|_{T=273.15} \\ \text{car : } h_{liq}|_{T=273.15} = 0 \text{ et } h_v|_{T=273.15} - h_{liq}|_{T=273.15} = L|_{T=273.15} \end{cases}$$

Finalement, l'enthalpie spécifique massique de la vapeur d'eau s'écrit :

$$h_v = \underbrace{L}_{\text{chaleur latente}} + \underbrace{C_{p_v} t}_{\text{chaleur sensible}} \quad [6]$$

et l'enthalpie pour la masse m_v de vapeur s'écrit (à l'aide de l'équation 4) :

$$H_v = m_v (L + C_{p_v} t) = \omega m_{as} (L + C_{p_v} t)$$

Une démarche similaire peut être utilisée pour calculer l'enthalpie de l'eau liquide. L'enthalpie d'un liquide dépend de la pression :

$$dh = C_p dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dP$$

mais à pression constante, on a simplement :

$$dh = C_p dT$$

$$h_{liq}(T) - h_{liq}(273.15) = \int_{273.15}^T C_{p_{liq}} dT$$

en tenant compte du fait que $h_{liq}(273.15)=0$ et en prenant pour hypothèse que $C_p=C_{te}$, on obtient :

$$h_{liq} = C_{p_{liq}} t$$

soit : $h_{liq}=4,182 t$ avec h_{liq} en kJ/kg.

L'enthalpie du mélange est alors égale, d'après la loi de Dalton, à la somme des enthalpies partielles qu'auraient les gaz constituants s'ils occupaient seuls le volume total à la température du mélange, soit :

$$\begin{cases} H = H_{as} + H_v \\ H = m_{as} (C_{p_{as}} + \omega C_{p_v}) t + m_{as} \omega L \end{cases} \quad [7]$$

Dans le cas de l'air humide, on définit des grandeurs spécifiques qui sont ramenées à l'unité de masse d'air sec et non pas à l'unité de masse du mélange d'air qui serait égal à la masse du mélange d'air sec plus celle de vapeur d'eau (ce que l'on appelle l'air humide). On définit ainsi une enthalpie spécifique de l'air humide, h :

$$h = \frac{H}{m_{as}} = \underbrace{(C_{p_{as}} + \omega C_{p_v})}_{\text{chaleur sensible}} t + \underbrace{\omega L}_{\text{chaleur latente}} \quad [8]$$

$$h = (1,006 + 1,826 \omega) t + 2500 \omega, \quad h \text{ en kJ/kg}_{as}, \quad \omega \text{ en kg/kg}_{as}, \quad t \text{ en } ^\circ\text{C} \quad [9]$$

Le plus important intérêt de cette formulation réside dans le fait que toutes les propriétés pourront, par la suite, être calculées à partir de la masse d'air sec.

Les différentes valeurs numériques des grandeurs introduites dans les formules données plus haut sont les suivantes [3, 4, 5, 6]:

$L(273.15\text{ K}) = 2483\text{ kJ.kg}^{-1} \sim 2500\text{ kJ.kg}^{-1}$	$M_{as} = 28.966\text{ g.mol}^{-1}$
$C_{pv} = 1,826\text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$M_v = 18.0153\text{ g.mol}^{-1}$
$C_{pas} = 1,006\text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$C_{pliq} = 4,182\text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$R = 8.314472\text{ J/mol.K}$	

II. Température humide:

Considérons le « laveur » présenté dans les figures 1a et 1b. C'est un composant qui sert de contacteur entre un flux d'air et d'eau liquide [7, 8]. Ce contacteur est supposé être isolé thermiquement de l'environnement (conditions adiabatiques pour les échanges thermiques). Au cours de son passage dans le laveur, l'air s'humidifie jusqu'à ce que la pression partielle de vapeur d'eau soit égale à la pression de vapeur saturante de l'eau à la température du liquide. Cette humidification de l'air s'accompagne d'une variation de température de l'air, que l'on va calculer. De l'eau liquide est injectée dans ce laveur afin d'assurer la permanence d'une quantité constante d'eau liquide dans le laveur. Généralement, l'eau est pulvérisée et re-circule dans le laveur afin d'assurer un bon contact avec l'air. Dans la suite, nous ne nous préoccupons pas de l'efficacité du laveur puisque nous supposons que la pression partielle de vapeur d'eau en sortie du laveur est rigoureusement égale à la pression de vapeur saturante. On injecte donc un débit d'air supposé constant dans ce laveur. Le débit d'eau qu'il faut injecter est également constant en régime permanent. D'un point de vue de la thermodynamique, on a un système ouvert fonctionnant en régime stationnaire avec écoulements permanents d'air et d'eau. On va donc pouvoir écrire les lois de conservation de la masse et de l'énergie pour ce système ouvert.

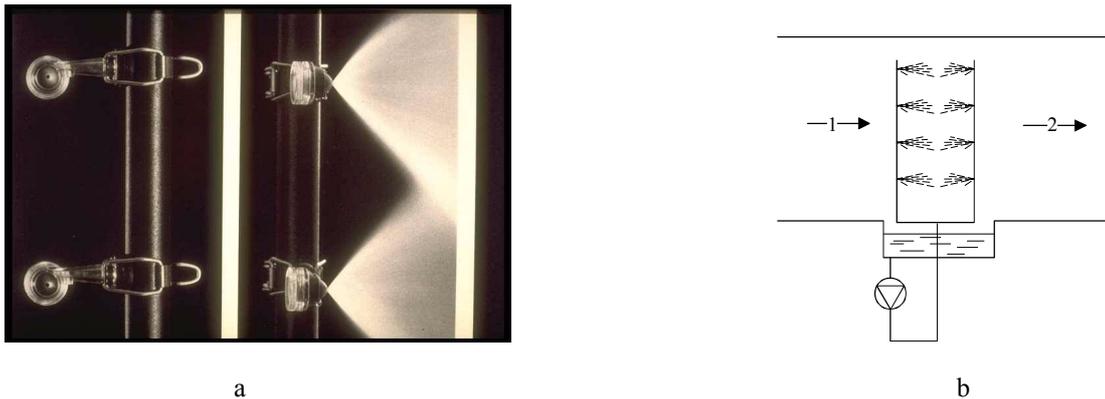


Figure 1 : humidificateur à pulvérisation (a : technologie et mise en oeuvre, b : représentation schématique)

II.1. Conservation de la masse:

Affectons du suffixe 1 l'air entrant et du suffixe 2 l'air sortant et écrivons la conservation de l'air sec, on obtient :

$$\dot{m}_{as}^1 - \dot{m}_{as}^2 = 0$$

La conservation de la masse d'eau s'écrit quant à elle :

$$\dot{m}_{as}^1 \omega_1 + \dot{m}_{liq} - \dot{m}_{as}^2 \omega_{sat}^h = 0$$

où nous avons introduit le débit liquide (\dot{m}_{liq}) et l'humidité spécifique correspondant à la vapeur saturante (ω_{sat}^h). On peut introduire $\delta\omega$ ce qui permet d'écrire le débit liquide sous la forme :

$$\dot{m}_{liq} = \dot{m}_{as}^1 \delta\omega$$

et donc :

$$\delta\omega = \omega_{\text{sat}}^h - \omega_1$$

II.2. Conservation de l'énergie :

Appliquons le premier principe pour un système ouvert en régime stationnaire et écoulement permanent

$$0 = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{e,s} \dot{m}_{e,s} \left(h + \frac{1}{2} \hat{V}^2 + gz \right)_{e,s}$$

En négligeant les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle, on a :

$$0 = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{e,s} \dot{m}_{e,s} (h)_{e,s}$$

en tenant compte que le système n'échange ni chaleur ni travail mécanique avec l'extérieur, on arrive à :

$$0 = \sum_{e,s} \dot{m}_{e,s} (h)_{e,s}$$

La conservation de l'énergie se réduit à une conservation de l'enthalpie. Les flux d'enthalpie sont constitués en entrée : du flux d'enthalpie de l'air entrant et du flux d'enthalpie de l'eau liquide et en sortie uniquement du flux d'enthalpie de l'air sortant.

$$\dot{m}_{\text{as}}^1 h^1 + \dot{m}_{\text{liq}} h_{\text{liq}} - \dot{m}_{\text{as}}^2 h^2 = 0$$

qui, compte tenu des précédentes équations, s'écrit :

$$\underbrace{\dot{m}_{\text{as}}^1 [(C_{\text{pas}} + \omega_1 C_{\text{pv}}) t_1 + \omega_1^s L]}_{\dot{m}_{\text{as}}^1 h^1} + \underbrace{\dot{m}_{\text{as}}^1 \delta\omega C_{\text{pliq}} t_1}_{\dot{m}_{\text{liq}} h_{\text{liq}}} - \underbrace{\dot{m}_{\text{as}}^1 [(C_{\text{pas}} + \omega_{\text{sat}}^h C_{\text{pv}}) t_h + \omega_{\text{sat}}^h L]}_{\dot{m}_{\text{as}}^2 h^2} = 0$$

où nous avons introduit t_h , « température humide » de « l'air humide » sortant du laveur et le fait que $\dot{m}_{\text{as}}^1 = \dot{m}_{\text{as}}^2$. Nous pouvons diviser l'équation précédente par \dot{m}_{as}^1 , faire passer le terme en t_h dans le second membre et regrouper tous les termes en t_1 :

$$(C_{\text{pas}} + \omega_{\text{sat}}^h C_{\text{pv}}) t_h = (C_{\text{pas}} + \omega_1 C_{\text{pv}} + \delta\omega C_{\text{pliq}}) t_1 + (\omega_1 - \omega_{\text{sat}}^h) L$$

mais $(\omega_1 - \omega_{\text{sat}}^h) = -\delta\omega$ si bien que l'on a :

$$(C_{\text{pas}} + \omega_{\text{sat}}^h C_{\text{pv}}) t_h = [C_{\text{pas}} + \omega_{\text{sat}}^h C_{\text{pv}} + \delta\omega (C_{\text{pliq}} - C_{\text{pv}})] t_1 - \delta\omega L$$

$$\Leftrightarrow t_h = \frac{[C_{\text{pas}} + \omega_{\text{sat}}^h C_{\text{pv}} + \delta\omega (C_{\text{pliq}} - C_{\text{pv}})] t_1 - \delta\omega L}{(C_{\text{pas}} + \omega_{\text{sat}}^h C_{\text{pv}})}$$

t_h représente la température humide d'un air pris à la température sèche t_1 et à l'humidité spécifique ω_1 si bien que par simplification, t_1 et ω_1 deviendront t et ω dans ce qui suit.

$$\Leftrightarrow t_h = t + \frac{\delta\omega [(C_{\text{pliq}} - C_{\text{pv}}) t - L]}{(C_{\text{pas}} + \omega_{\text{sat}}^h C_{\text{pv}})}, \quad t_h \text{ et } t \text{ en } ^\circ\text{C}, \quad \omega \text{ et } \omega_{\text{sat}}^h \text{ en kg/kg}_{\text{as}} \quad [10]$$

Le terme $(C_{\text{pliq}} - C_{\text{pv}}) t_1$ est beaucoup plus petit que L et peut généralement être négligé. Par exemple si $t = 30^\circ\text{C}$, $(C_{\text{pliq}} - C_{\text{pv}}) t = (4,182 - 1,826) 30 = 70 \text{ kJkg}^{-1}$ à comparer à $L=2500 \text{ kJkg}^{-1}$. Si donc ce terme est négligé, on obtient :

$$t_h \approx t - \frac{L(\omega_{\text{sat}}^h - \omega)}{(C_{p_{\text{as}}} + \omega_{\text{sat}}^h C_{p_v})}, \quad t_h \text{ et } t \text{ en } ^\circ\text{C}, \quad \omega \text{ et } \omega_{\text{sat}}^h \text{ en kg/kg}_{\text{as}} \quad [11]$$

III Humidité relative

Il s'agit du rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de saturation de cette vapeur d'eau à la température t .

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{\text{Sat}}(t)}, \quad [12]$$

elle est généralement exprimée en % ($\varphi=100\%$: air saturé ; $\varphi=0\%$: air totalement sec).

IV Température de rosée

Il s'agit de la température pour laquelle l'air devient saturé pour la pression de vapeur d'eau P_v considérée. Or P_v intervient dans l'expression de l'humidité spécifique ω , si bien que la température de rosée représente encore la température de saturation à humidité spécifique constante.

V Equilibre de l'eau pure

L'eau vapeur en équilibre avec l'eau liquide constitue un équilibre monovariant. L'eau vapeur en équilibre avec l'eau solide constitue aussi un équilibre monovariant. Ainsi, il existe une relation univoque reliant température et pression de saturation pour chacun de ces équilibres. Celle-ci peut prendre différentes formes selon les auteurs [9, 10]. On a par exemple :

- pour l'équilibre liquide/vapeur :

$$\begin{cases} \text{Log}_{10}(P_{\text{Sat}}) = \frac{7.625 * t}{241 + t} + 2.7877 \\ \text{ou encore } t = -241 \frac{\text{Log}_{10}(P_{\text{Sat}}) - 2.7877}{\text{Log}_{10}(P_{\text{Sat}}) - 2.7877 - 7.625} \end{cases}, \quad P \text{ en Pa, } t \text{ en } ^\circ\text{C} \quad [13a]$$

- pour l'équilibre solide/vapeur :

$$\begin{cases} \text{Log}_{10}(P_{\text{Sat}}) = \frac{9.756 * t}{272.7 + t} + 2.7877 \\ \text{ou encore } t = -272.7 \frac{\text{Log}_{10}(P_{\text{Sat}}) - 2.7877}{\text{Log}_{10}(P_{\text{Sat}}) - 2.7877 - 9.756} \end{cases}, \quad P \text{ en Pa, } t \text{ en } ^\circ\text{C} \quad [13b]$$

VI Volume massique, volume spécifique

Le volume massique v^* est le volume occupé par l'unité de masse d'air humide. Un volume V contenant m_{as} kg d'air sec et m_v de vapeur d'eau a donc un volume massique :

$$v^* = \frac{V}{m_{\text{as}} + m_v}$$

or $m = \frac{MPV}{RT}$, on a alors $v^* = \frac{T}{\frac{P - P_v}{287.05} + \frac{P_v}{461.52}}$

avec $\frac{R}{M_{\text{as}}} = \frac{8.314472}{28.966 \cdot 10^{-3}} = 287.5 \text{ J/kg.K}$ et $\frac{R}{M_v} = \frac{8.314472}{18.0153 \cdot 10^{-3}} = 461.52 \text{ J/kg.K}$

or $\omega = 0,622 \frac{P - P_{\text{as}}}{P_{\text{as}}} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v}$, on a alors $v^* = \frac{461.52(0.622 + \omega) T}{(1 + \omega) P}$ en m^3 par kg d'air humide.

Le volume spécifique est par définition le volume d'air humide contenant l'unité de masse d'air sec et s'écrit :

$$v'' = \frac{V}{m_{as}} = v'' * \frac{m_{as} + m_v}{m_{as}} = v'' * (1 + \omega)$$

On a alors :

$$v'' = \frac{461.52 (0.622 + \omega) T}{P}, P \text{ en Pa, } T \text{ en K, } \omega \text{ en kg/kg}_{gas}, v'' \text{ en m}^3/\text{kg}_{gas} \quad [14]$$

VII Récapitulatif des équations

Humidité spécifique

$$\omega = 0,622 \frac{P - P_{as}}{P_{as}} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v}, \omega \text{ en kg/kg}_{gas}, P, P_{as} \text{ et } P_v \text{ en Pa} \quad [5]$$

Enthalpie du mélange:

$$h = (1,006 + 1,826 \omega) t + 2500 \omega, h \text{ en kJ/kg, } t \text{ en } ^\circ\text{C, } \omega \text{ en kg/kg}_{gas} \quad [9]$$

Température humide:

$$t_h \approx t - \frac{2500 (\omega_{sat}^h - \omega)}{(1,006 + 1,826 \omega_{sat}^h)}, t_h \text{ et } t_1 \text{ en } ^\circ\text{C, } \omega_1 \text{ et } \omega_{sat}^h \text{ en kg/kg}_{gas} \quad [11]$$

Humidité relative

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{Sat}(t)}, P_v \text{ et } P_{sat} \text{ en Pa, } \varphi \text{ généralement en } \% \quad [12]$$

Equilibre liquide/vapeur :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Log}_{10}(P_{Sat}) = \frac{7.625 * t}{241 + t} + 2.7877 \\ \text{ou encore } t = -241 \frac{\text{Log}_{10}(P_{Sat}) - 2.7877}{\text{Log}_{10}(P_{Sat}) - 2.7877 - 7.625} \end{array} \right., P_{sat} \text{ en Pa, } t \text{ en } ^\circ\text{C} \quad [13a]$$

Equilibre solide/vapeur :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Log}_{10}(P_{Sat}) = \frac{9.756 * t}{272.7 + t} + 2.7877 \\ \text{ou encore } t = -272.7 \frac{\text{Log}_{10}(P_{Sat}) - 2.7877}{\text{Log}_{10}(P_{Sat}) - 2.7877 - 9.756} \end{array} \right., P \text{ en Pa, } t \text{ en } ^\circ\text{C} \quad [13b]$$

Volume spécifique

$$v'' = \frac{461.52 (0.622 + \omega) T}{P}, P \text{ en Pa, } T \text{ en K, } v'' \text{ en m}^3/\text{kg}_{gas}, \omega \text{ en kg/kg}_{gas} \quad [14]$$

Deux méthodes s'offrent alors à l'opérateur lorsqu'il s'agit de travailler sur les propriétés de l'air humide. La première passe par l'utilisation numérique de ces équations [11] pour calculer les caractéristiques « manquantes » (par exemple le calcul de l'humidité relative à partir de la température sèche et de la température humide lues sur un psychromètre). La seconde consiste à utiliser la représentation graphique de ses équations sur un abaque appelée diagramme de l'air humide ou encore diagramme psychrométrique [12] dont on trouvera un exemple en annexe

VIII Présentation du diagramme de l'air humide :

Plusieurs types de diagrammes sont utilisés et dépendent principalement des coordonnées utilisées pour sa représentation

Citons par exemple celui utilisé par CARRIER où le repère (t, ω) est orthonormé (isothermes et iso humidité spécifiques : droites parallèles, isenthalpes : non droites parallèles) ou bien encore le diagramme développé par VERON-CASARI où dans ce cas les isenthalpes et les iso humidité spécifiques sont des droites parallèles, les isothermes ne l'étant pas.

Notons enfin que, quelle que soit la forme prise par ces diagrammes, ils ont tous la particularité de n'être valable que pour la seule pression ayant servi à les construire, généralement la pression atmosphérique (101325 Pa). Toutefois, les valeurs restent quand même acceptables pour des altitudes variant entre -200 et +250 m par rapport au niveau de la mer. Si les conditions géographiques conduisaient à des pressions assez différentes de celles-ci, un diagramme spécifique devrait être créé pour l'occasion (cf la ville de Mexico [13]).

Un tel diagramme (figure 2) prend la forme suivante :

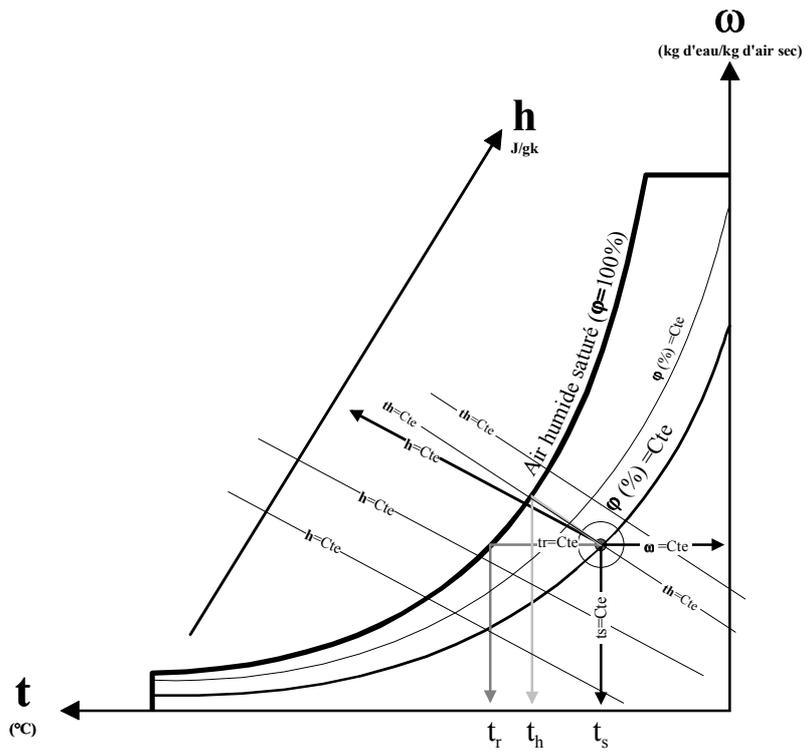


Figure 2 : diagramme de l'air humide et principales courbes caractéristiques.

OPERATIONS UNITAIRES SUR L'AIR HUMIDE

L'air est le véhicule privilégié de la chaleur, du froid ou de l'humidité dans un bâtiment à climatiser, un entrepôt frigorifique ou une salle blanche.

Il est donc généralement soumis, depuis sa collecte à l'extérieur à un certain nombre d'opérations de transformation avant sa diffusion dans l'enceinte à climatiser. Nous nous proposons de présenter celles-ci dans les paragraphes qui suivent.

I Mélange adiabatique [14, 15]

Pour diverses raisons, on peut être amené à mélanger deux airs de natures différentes. Dans la mesure où chacune des transformations est considérée comme étant unique, il n'y a pas d'autre opération que le mélange, si bien que l'absence d'échange de chaleur le qualifie d'adiabatique. La technologie mise en œuvre pour réaliser cette opération est relativement simple et se résume souvent à un « T » dont les débits entrant sont contrôlés par des systèmes de volets réglables que l'on appelle registres (cf figure 3).

Généralement, on connaît deux des flux et on cherche à déterminer le troisième. La résolution passe par l'écriture de deux équations, l'une de conservation de masse, l'autre d'énergie.



Figure 3 : caissons de mélange : technologies et représentation schématique

Le bilan masse sur l'air sec seul s'exprime selon :

$$\dot{m}_{as}^1 + \dot{m}_{as}^2 - \dot{m}_{as}^3 = 0$$

le bilan sur l'eau seule s'exprime quant à lui suivant :

$$\dot{m}_v^1 + \dot{m}_v^2 - \dot{m}_v^3 = 0$$

soit encore

$$\dot{m}_{as}^1 \omega_1 + \dot{m}_{as}^2 \omega_2 - \dot{m}_{as}^3 \omega_3 = 0 \quad [15]$$

L'écriture du premier principe de la thermodynamique (bilan énergétique) en système ouvert, en régime permanent et en négligeant énergie cinétique et potentielle s'écrit :

$$\dot{m}_{as}^1 h^1 + \dot{m}_{as}^2 h^2 - \dot{m}_{as}^3 h^3 = 0 \quad [16]$$

le traitement de ces équations conduit alors à :

$$\frac{\dot{m}_{as}^1}{\dot{m}_{as}^2} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} \quad \text{et} \quad \frac{\dot{m}_{as}^1}{\dot{m}_{as}^2} = \frac{h^2 - h^3}{h^3 - h^1} \quad [17]$$

Ces équations montrent que dans une représentation (ω, h) , cas du diagramme à coordonnées obliques, les points 1, 2 et 3 doivent être alignés puisque le point de mélange se place entre les points 1 et 2, au prorata des débits 1 et 2 (cf figure 4).

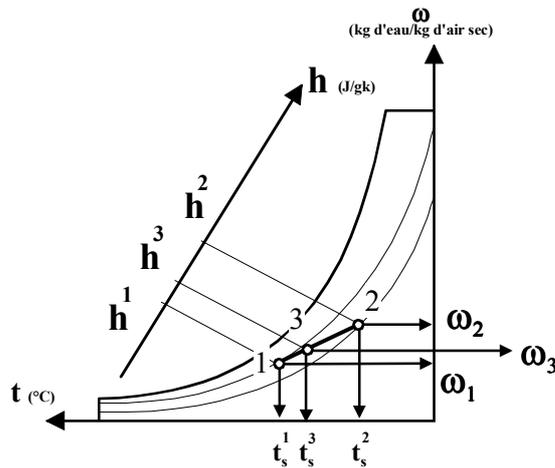


Figure 4 : représentation d'un mélange dans le diagramme de l'air humide.

II Chauffage ou refroidissement à humidité spécifique constante [16, 17] (apport ou extraction de chaleur sensible)

Que l'on ait affaire à un processus de chauffage ou de refroidissement sans condensation, on peut traiter chaque cas de façon similaire. Ce travail passe comme précédemment par la résolution du bilan massique et énergétique.

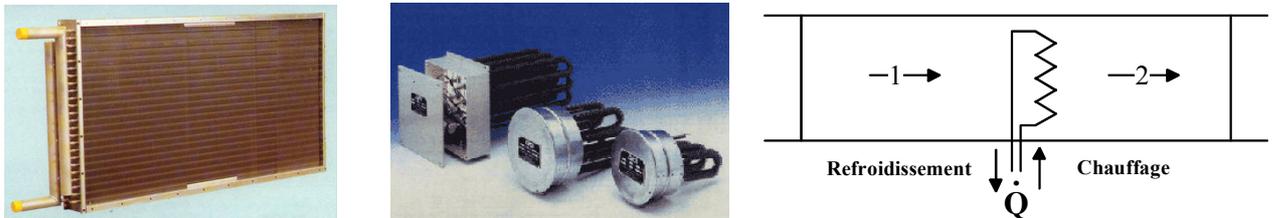


Figure 5 : batterie à eau (glacée ou chaude), épingle chauffante électrique et représentation schématique de la transformation.

Le régime étant établi, le système de chauffage ou de refroidissement n'induisant ni entrée ni sortie d'eau les bilans de matière sont assez simples et conduisent à :

- Pour l'air sec : $\dot{m}_{as}^1 - \dot{m}_{as}^2 = 0$ [18]
- Pour l'eau : $\dot{m}_v^1 - \dot{m}_v^2 = 0$ soit encore $\dot{m}_{as}^1 \omega_1 - \dot{m}_{as}^2 \omega_2 = 0$

Le bilan énergétique s'exprime quant à lui selon :

$$\dot{m}_{as}^1 h^1 - \dot{m}_{as}^2 h^2 + \dot{Q} = 0 \quad [19]$$

Le système ne comportant ni source ni puits de matière, la masse de vapeur au point 2 est la même qu'au point 1. En d'autres termes, l'humidité spécifique reste constante au cours de cette transformation ($\omega_1 = \omega_2$).

Le bilan énergétique devient alors :

$$\dot{Q} = \dot{m}_{as}^1 (h^2 - h^1) \quad [20]$$

RQ : L'humidité spécifique demeurant constante, il en est de même pour la température de rosée des deux points (cf figure 2).

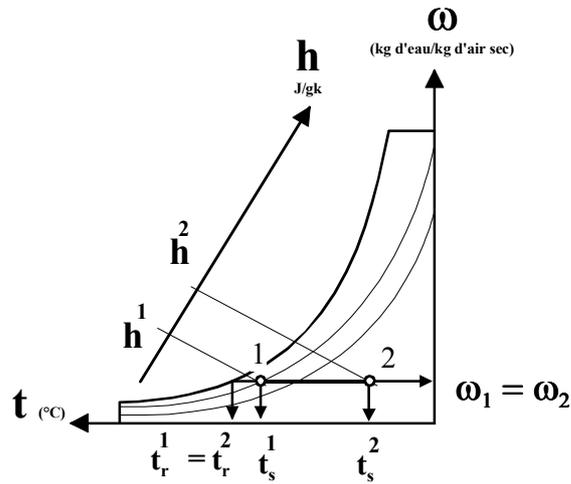


Figure 6 : représentation d'un chauffage (1-2) ou d'un refroidissement sans déshumidification (2-1) dans le diagramme de l'air humide.

III Refroidissement avec déshumidification [18, 19]

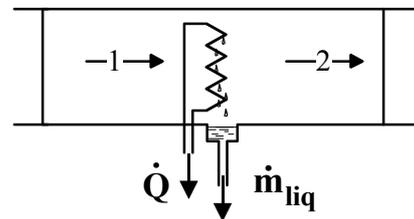


Figure 7 : batterie à eau glacée de refroidissement et déshumidification et représentation schématique.

Contrairement au cas précédent, il y a ici déshumidification, donc nécessité impérative pour réaliser cette opération que la température de surface de l'échangeur soit inférieure à la température de rosée de l'air entrant.

La caractérisation de la transformation passe comme nous l'avons déjà vu pour d'autres opérations par l'écriture du bilan de masse et d'énergie. Du premier on obtient :

- Pour l'air sec : $\dot{m}_{as}^1 - \dot{m}_{as}^2 = 0$
- Pour l'eau : $\dot{m}_v^1 - \dot{m}_v^2 - \dot{m}_{liq} = 0$

soit encore

$$\dot{m}_{as}^1 \omega_1 - \dot{m}_{as}^2 \omega_2 - \dot{m}_{liq} = 0 \quad [21]$$

Du second :

$$\dot{m}_{as}^1 h^1 - \dot{m}_{as}^2 h^2 + \dot{Q} - \dot{m}_{liq} h_{liq} = 0 \quad [22]$$

Du bilan masse, on tire :

$$\dot{m}_{liq} = \dot{m}_{as}^1 (\omega_1 - \omega_2) \quad [23]$$

Du bilan énergétique, on tire :

$$\dot{Q} = \dot{m}_{as}^1 (h^2 - h^1) + \dot{m}_{as}^1 (\omega_1 - \omega_2) h_{liq} \quad [24]$$

Cette transformation peut être en fait décomposée en deux transformations élémentaires :

1->2' : Evolution à température sèche constante (apport de chaleur **latente** uniquement)

2'->2 : Evolution à humidité spécifique constante (apport de chaleur **sensible** uniquement)

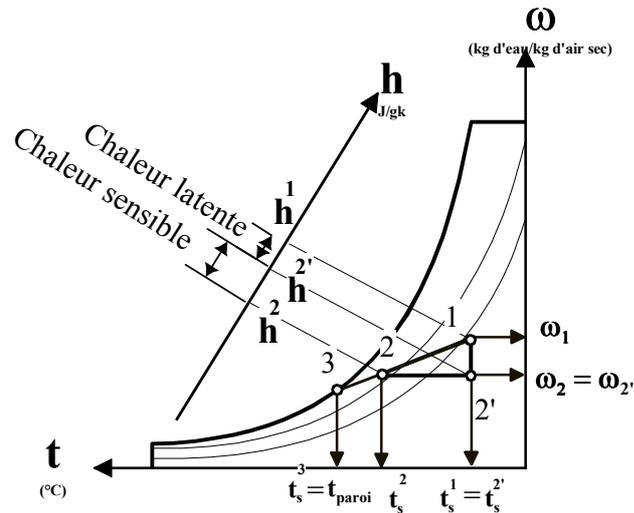


Figure 8 : représentation d'une déshumidification par refroidissement dans le diagramme de l'air humide. Décomposition de la chaleur totale échangée en chaleur latente (1-2') et en chaleur sensible (2'-3).

Il est assez fréquent que la quantité de chaleur (h^1-h^2) associée à la transformation soit comparée à la quantité maximale (h^1-h^3) qu'aurait échangé l'air s'il était sorti à saturation à la température de paroi de l'échangeur (t_{paroi} de la figure 8). L'évolution réelle se compare alors à celle idéale au travers d'une efficacité définie selon :

$$\varepsilon = \frac{h^1 - h^2}{h^1 - h^3} \quad [25]$$

IV Humidification par injection de vapeur d'eau [20, 21, 22]

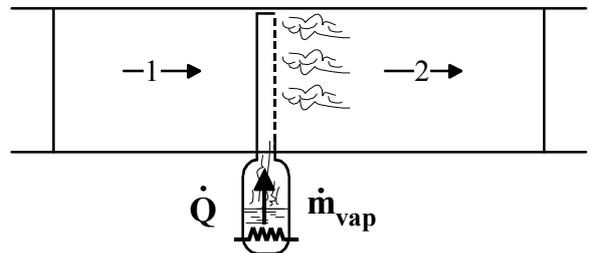
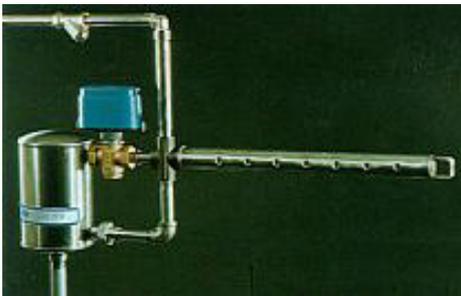


Figure 9 : Rampe d'injection de vapeur d'eau et principe de fonctionnement d'un humidificateur vapeur.

La caractérisation d'une telle transformation est issue des bilans de masses et d'énergie qui s'écrivent :

- Pour la masse d'air sec : $\dot{m}_{\text{as}}^1 - \dot{m}_{\text{as}}^2 = 0$

- Pour la masse d'eau : $\dot{m}_v^1 - \dot{m}_v^2 + \dot{m}_{\text{vap}} = 0$

$$\text{soit encore : } \dot{m}_{\text{as}}^1 \omega_1 - \dot{m}_{\text{as}}^2 \omega_2 + \dot{m}_{\text{vap}} = 0 \quad [26]$$

- Pour l'énergie : $\dot{m}_{\text{as}}^1 h_s^1 - \dot{m}_{\text{as}}^2 h_s^2 + \dot{m}_{\text{vap}} h_{\text{vap}} = 0 \quad [27]$

Et conduisent à :

$$\dot{m}_{\text{vap}} = \dot{m}_{\text{as}}^1 (\omega_2 - \omega_1) \quad [28]$$

Ce type de transformation s'effectue avec une élévation de température mais d'amplitude faible (figure10).

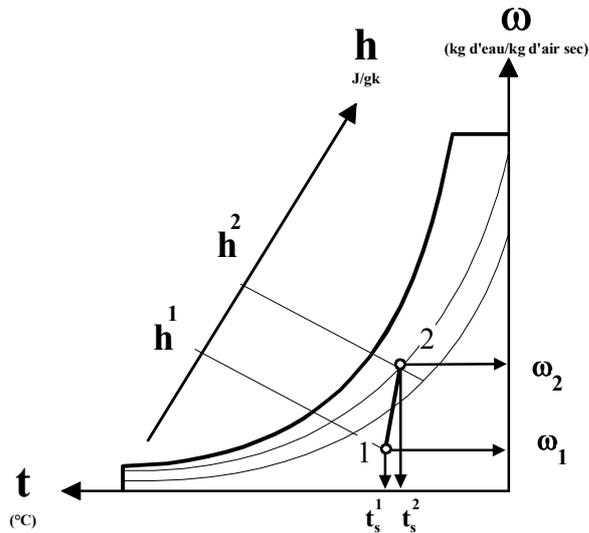


Figure 10 : représentation dans le diagramme de l'air humide d'une humidification par injection de vapeur d'eau.

V Humidification par injection de d'eau [23, 24]

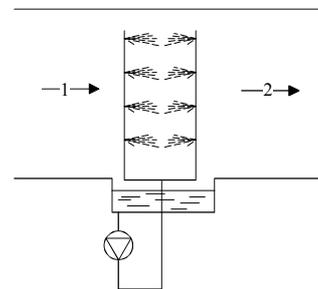


Figure 11 : Pulvérisateur d'eau et représentation schématique d'un humidificateur à injection de vapeur d'eau.

Lorsque le système est à recirculation d'eau, celle-ci n'est ni chauffée ni refroidie. Par conséquent, on peut considérer que cette transformation s'effectue à enthalpie constante (cf II en première partie). Ainsi, cette humidification s'accompagne d'un refroidissement de l'air.

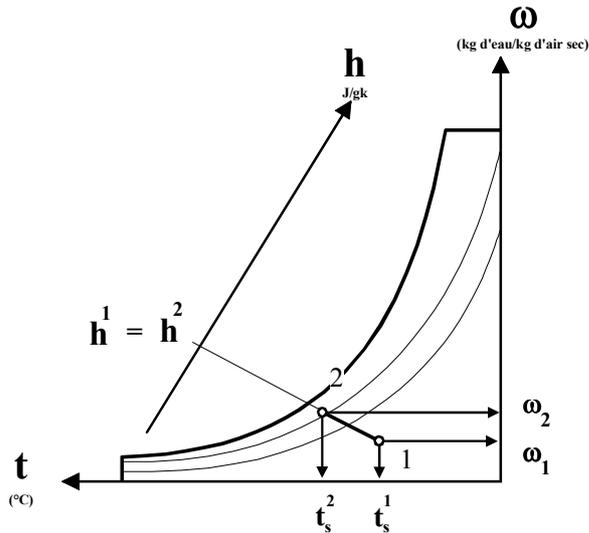


Figure 12 : représentation du refroidissement par humidification par pulvérisation d'eau (système à recirculation : isenthalpe) dans le diagramme de l'air humide.

Lorsque l'humidification s'effectue avec de l'eau chauffée (figure A), selon la température de cette eau on peut obtenir en sortie :

1->2 : de l'air humide et réchauffé

1->2' : de l'air humide et refroidi

Lorsque l'humidification s'effectue avec de l'eau refroidie (figure B), on obtient en sortie toujours de l'air humide et refroidi (et plus refroidi que dans la transformation isenthalpe sans chauffage ni refroidissement).

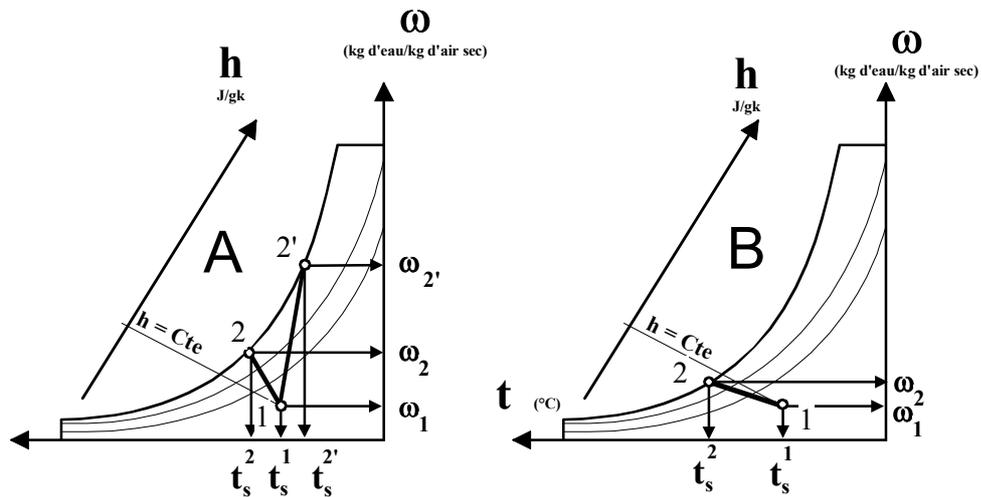


Figure 13 : Représentation des évolutions subies par l'air lors :
 A) d'une humidification par injection d'eau chauffée
 B) d'une humidification par injection d'eau refroidie

Comme dans le cas de la déshumidification, ces transformations d'humidification peuvent être séparées en :

1->2' : Evolution à humidité spécifique constante (échange de chaleur **sensible** uniquement)

2'->2 : Evolution à température sèche constante (échange de chaleur **latente** uniquement)

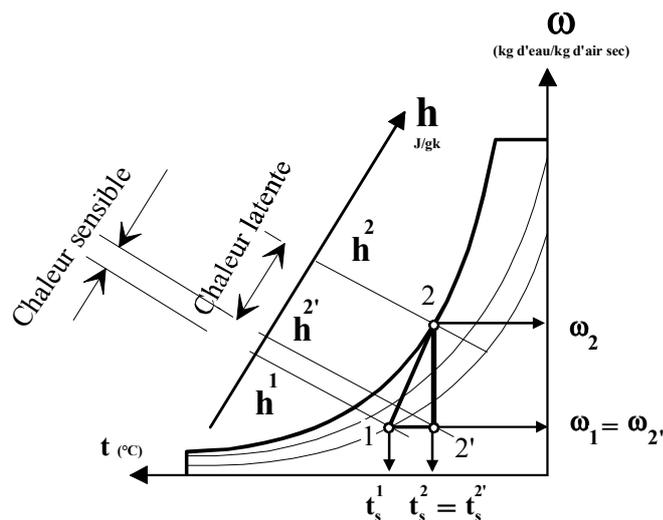


Figure 14 : représentation d'une humidification par injection d'eau dans le diagramme de l'air humide, décomposition de la chaleur totale échangée en chaleur sensible et en chaleur latente.

VI Déshumidification par sorption

Il existe d'autres moyens de déshumidifier l'air que celui utilisant une batterie froide dont la température de paroi est inférieure à celle de rosée de l'air à traiter. Les procédés correspondants reposent pour l'essentiel sur des phénomènes de sorption soit liquide soit solide [9, 25]. L'absorption de vapeur d'eau contenue dans l'air consiste à faire passer cet air au travers d'un laveur où circule une solution absorbante (chlorure de calcium par exemple). La seconde technique utilise les propriétés adsorbantes d'un matériau solide (zéolithe, silica-gel, chlorure de lithium par exemple). La mise en œuvre est assurée au moyen d'une roue dessiccante [26, 27, 28] sur laquelle est disposé ce solide adsorbant comme schématisé dans la figure 15., Seule une partie de cette roue est en contact avec l'air à traiter (généralement 3/4 de la section de passage), l'autre partie servant à régénérer le système. Ainsi, l'air à traiter (process air) traverse la roue pour en ressortir plus sec (dry air) mais aussi plus chaud car la réaction d'adsorption est exothermique. La roue s'étant chargée d'eau, il est nécessaire de la lui retirer avant de pouvoir à nouveau jouer son rôle. Aussi, un flux d'air traverse le quart de roue restant. Cet air est préalablement chauffé (plusieurs dizaines de degrés) avant son introduction dans la roue où il désorbe l'eau qui y est contenue. La réaction étant endothermique, l'air ressort alors moins chaud et chargé d'humidité (wet air).

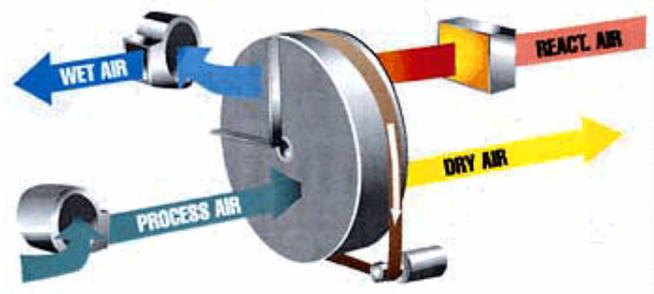


Figure 15 : Installation industrielle et principe de fonctionnement d'une roue dessiccante.

L'évolution de l'air au travers de la roue (dans un sens comme dans l'autre) ne fait pas strictement l'unanimité. Elle est soit définie comme étant isenthalpe [10] ou bien comme effectuée à température humide constante [25]. Toutefois la différence entre ces deux évolutions (iso-h ou iso-t_h) étant finalement assez peu marquée dans les calculs comme dans un diagramme, l'une ou l'autre des hypothèses peut être considérée comme étant valable.

L'allure des transformations inhérentes au fonctionnement d'une roue dessiccante dans un diagramme prend la forme représentée dans la figure 16.

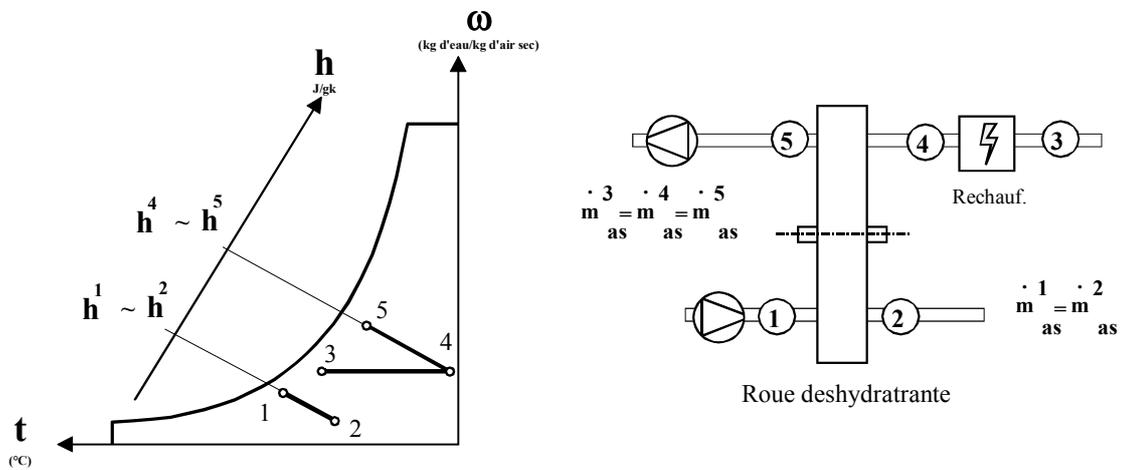


Figure 16 : Représentation du comportement d'une roue dessiccante dans un diagramme de l'air humide.

Au niveau des équations caractéristiques de ce type de transformation, elles restent dépendantes des sorbants mis en jeu et des technologies mises en œuvre et peuvent difficilement être uniques. Plusieurs constructeurs [28, 29] fournissent des outils de sélection adaptés aux besoins des utilisateurs.

En revanche, une situation commune à tous est le respect de la conservation de masse du système. En effet, la régénération (trajet 4-5 de la figure 16) doit évacuer la quantité d'eau qui a été retenue dans le trajet 1-2 si bien que l'on peut écrire :

$$\dot{m}_{as}^{1=2} (\omega_1 - \omega_2) = \dot{m}_{as}^{3=4=5} (\omega_5 - \omega_4) \quad [29]$$

Une dernière remarque au sujet des roues dessiccantes concerne les niveaux de déshumidification que l'on peut atteindre et la relative facilité avec laquelle on les obtient en comparaison d'une solution classique par refroidissement. Prenons par exemple un air à atteindre de 20 °C, 0.3 g/kg (exemple issu de la référence [28] : fabricant verrier) qui est tout à fait le domaine de travail aisément accessible par les systèmes de déshumidification par sorption.

Cet air est aussi défini par une température de rosée. Pour déshumidifier cet air de façon classique, il est nécessaire de le faire passer sur une batterie froide dont la température est inférieure à la température de rosée (environ -30 °C ici), soit par exemple -35/-40°C, ce qui impose par conséquent une technologie adéquate et plutôt lourde, cycle frigorifique biétagé en l'occurrence, ce qui rend cette solution souvent abandonnée lorsque de telles humidités sont visées.

VII Récupération de chaleur par échange thermique

Il est assez fréquent que l'air que l'on évacue d'une salle soit intéressant à recycler dans un système de climatisation. En effet, en hiver, on peut être amené à rejeter un air à 18/20°C alors qu'on puise à l'extérieur un air très vraisemblablement plus froid pour le chauffer et le souffler dans la pièce en question. On peut raisonner de même l'été où on rejète un air à 24/25°C alors que l'on puise à l'extérieur un air très vraisemblablement plus chaud pour le refroidir. Une des solutions, nous l'avons vu, consiste à mélanger cet air recyclé avec de l'air neuf et profiter ainsi d'une récupération d'énergie. Dans certains cas, il n'est

Chapitre II : Séchage

II Séchages des solides:

II.1 Introduction : le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit "sec" étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de "solide divisé" ou de poudre.

Le but de séchage est :

- Le liquide résiduel est incompatible avec la suite du procédé.
- Le produit humide se conserve mal (modification de l'aspect physique par agglomération des grains)
- Le coût du transport est plus élevé en présence de liquide.
- Le séchage permet outre l'élimination du liquide, la création de modifications de la structure interne du solide soit par exemple l'apparition d'une structure poreuse.
- Le champ d'application du séchage est particulièrement large : produits chimiques, pharmaceutiques, bois, papiers, matières plastiques.
- Le séchage est une opération de "séparation thermique", dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. En séchage, on devra donc s'intéresser à la fois au transfert de matière et de transfert de chaleur couplés.

Divers techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne suppose pas forcément par vaporisation, pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc. s'appelle déshydratation.

Le séchage est donc une technique particulière de déshydratation, le terme de séchage étant réservé au cas de la séparation par vaporisation du solvant.

II.2 Caractérisation des solides humides :

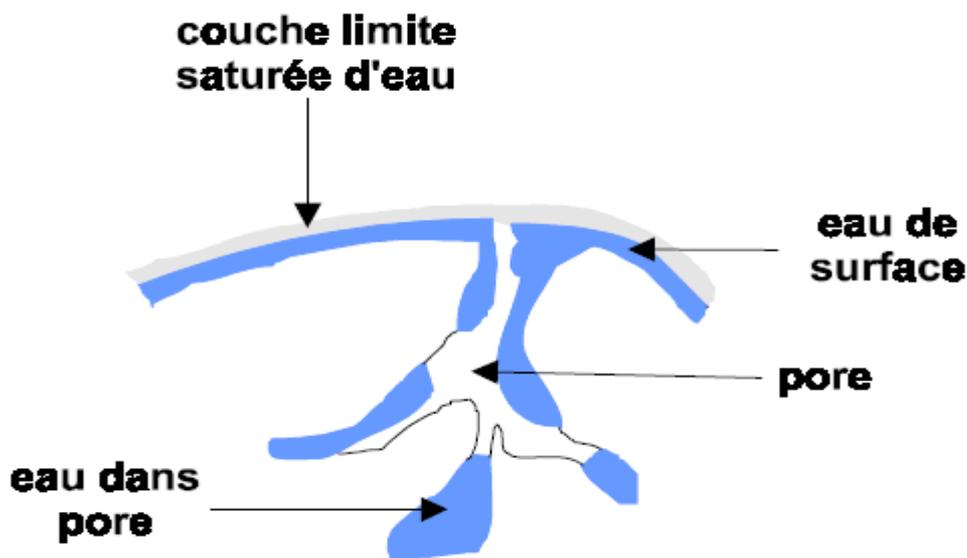
II.2.1 Humidité d'un solide : On définit l'**humidité d'un solide** comme la masse d'eau en kg associée à 1kg de solide sec (c'est en fait l'expression d'un rapport massique). On utilise fréquemment des pourcentages.

II.2.2 Description du solide humide :

Avant le séchage un solide humide peut se représenter schématiquement comme sur la figure suivante. Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles.

Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est à dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores: les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses.



III.2.3 Hygroscopicité :

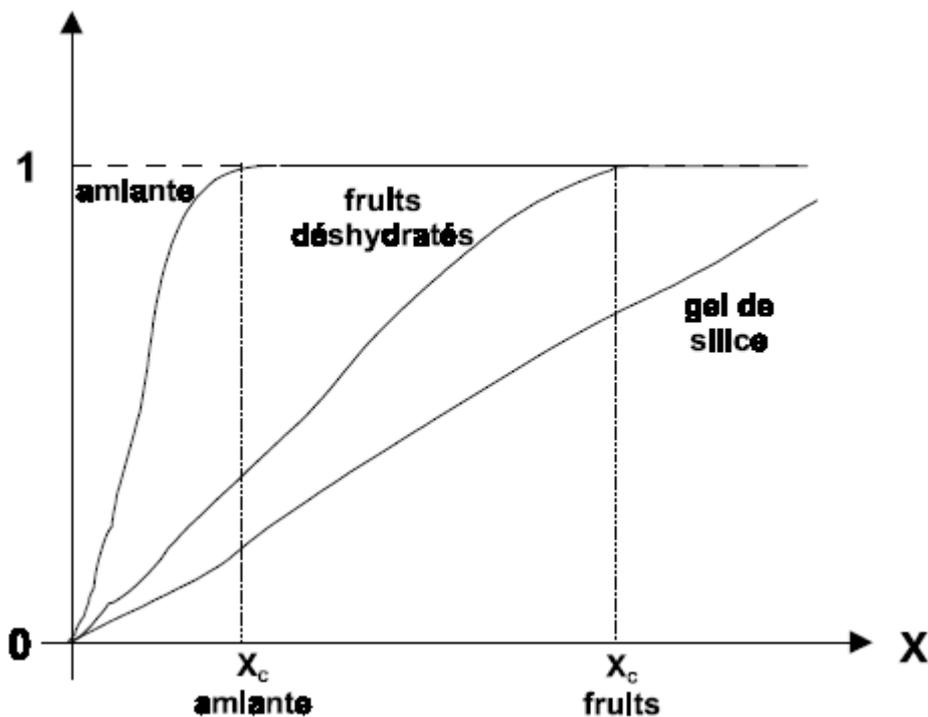
Un solide non hygroscopique est un solide pour lequel à l'équilibre la tension de vapeur du liquide l'imprégnant est maximale pour une température donnée (tension de vapeur "normale" du liquide si il était seul dans une enceinte). C'est le cas durant le séchage des solides qui possèdent un film d'eau superficiel ou des solides dont les interstices sont suffisamment gros pour permettre la diffusion assez rapide de l'eau des pores à la surface.

Un solide devient **hygroscopique** quand l'eau qu'il contient est en équilibre avec un air dont la pression partielle en eau est inférieure à la tension de vapeur maximale pour la température considérée. L'humidité relative de cet air est alors inférieure à 1. Ce comportement est du principalement aux forces liées à la capillarité qui ont tendance "à retenir l'eau en phase liquide".

Le tracé des isothermes d'adsorption permet de rendre compte de ce comportement. On trace expérimentalement à une température donnée la courbe d'équilibre de l'humidité relative de l'air au contact du solide humide en fonction de l'humidité de ce solide.

Plusieurs exemples de produits sont donnés sur la figure suivante. On s'aperçoit qu'en réalité tous les solides ont une certaine hygroscopicité. En dessous d'une humidité relative du solide inférieure à X_c , on observe que le solide humide est en équilibre avec un air non saturé en eau (humidité relative inférieure à 1). Bien entendu dans le cas de composés comme l'amiante, l'hygroscopicité est négligeable.

Par contre elle est marquée pour des solides poreux, des gels, des produits alimentaires déshydratés ...

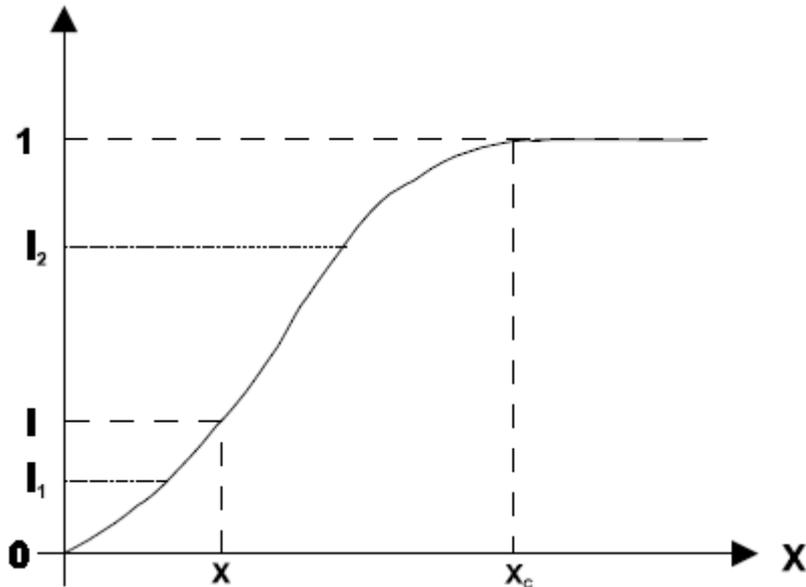


II.3 Comportement d'un solide humide dans de l'air :

II.3.1 Séchage et mouillage d'un solide

On note X_c l'humidité d'un solide en équilibre avec de l'air saturé ($i=1$) à la limite du domaine d'hygroscopicité. On considère ce solide d'humidité $X < X_c$ placé dans des courants d'air d'humidités relatives i_1 et i_2 . A cette humidité X correspond une humidité relative de l'air à l'équilibre égal à I . On examine sur l'isotherme de la figure suivante les différents transferts

d'eau possibles entre le solide et le courant d'air suivant les valeurs respectives de l'humidité relative de l'air et de l'humidité du solide.



On observe les deux comportements suivants:

$i_1 < I \Rightarrow$ désorption de l'eau donc séchage

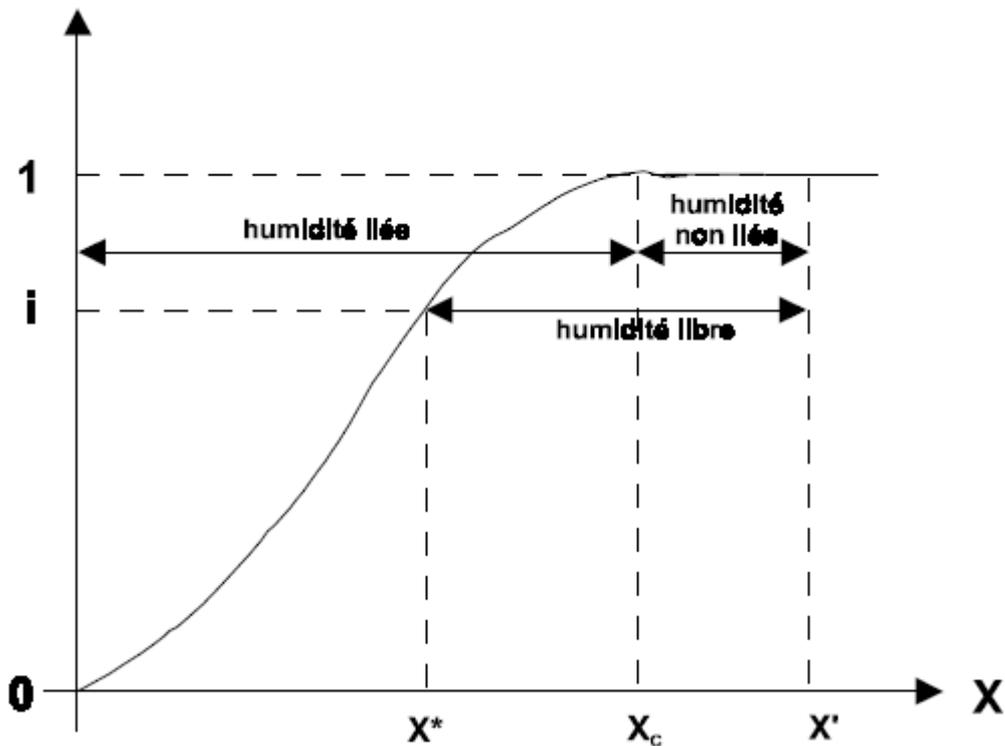
$i_2 > I \Rightarrow$ adsorption de l'eau donc mouillage du solide.

Remarque: on en déduit qu'un solide dans le domaine hygroscopique placé dans de l'air humide va absorber de l'eau jusqu'au moment où son humidité correspondra à l'équilibre avec l'air. La conséquence de ceci est que le stockage de composés hygroscopiques peut entraîner la formation d'agglomérats de solide dus à l'adsorption d'eau.

II.3.2 Les différentes humidités d'un solide :

Si un solide d'humidité $X' > X^*$ est soumis à un courant gazeux constant d'humidité relative i , il perd de l'eau jusqu'à ce que son humidité devienne égale à X^* (humidité du solide correspondant à l'équilibre avec l'air). Même en prolongeant le passage du courant gazeux on ne peut sécher plus et descendre en dessous de X^* . L'intervalle $X' - X^*$ correspond à l'**humidité libre** c'est à dire à l'humidité susceptible d'être enlevée au solide placé dans de l'air d'humidité relative i .

On distingue l'humidité liée ($X < X_c$) et l'humidité non liée ($X > X_c$) : l'humidité liée correspond au domaine hygroscopique du solide.



II.4 Méthode de séchage :

II.4.1 Séchage par convection :

a) Généralités :

C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie chimique: on envoie sur la matière à sécher un courant gazeux chaud (le plus sec possible) qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée. La température du gaz diminue entre l'entrée et la sortie alors que c'est le contraire pour le solide.

Dans un procédé en continu deux sens de circulation sont possibles pour le gaz et le solide à sécher. La circulation à contre-courant est toujours la plus efficace et permet un séchage plus poussé. L'inconvénient est par contre de mettre en présence à une extrémité du sécheur le gaz à sa température la plus élevée (le moins humide) avec du solide ayant l'humidité la plus faible. Le risque de détérioration du produit est donc important pour un produit thermosensible. Par contre pour un séchage à co-courant le séchage est le plus intense quand

le gaz chaud est en contact avec le solide ayant l'humidité la plus forte: le risque d'altération du produit diminue alors fortement.

b) Processus :

Si on considère un solide humide placé dans un courant d'air gazeux on observe au cours de l'opération de séchage trois périodes distinctes:

- une phase de mise en température du solide
- une phase de séchage à vitesse constante
- une phase de séchage à vitesse décroissante

⇒ L'étude de la phase à vitesse constante montre que cette phase est comparable à ce que serait l'évaporation d'eau si aucun solide n'était présent: on se trouve dans le cas où soit il y a beaucoup d'eau à la surface du solide soit la diffusion de l'eau de l'intérieur du solide vers la surface est suffisamment rapide.

Durant cette phase on considère que le séchage s'effectue de manière adiabatique car il n'y a aucun échange de chaleur avec l'extérieur. La chaleur latente de vaporisation de l'eau est entièrement fournie par le refroidissement de l'air chaud. Le processus s'effectue donc à **enthalpie constante**. L'air chaud dans le diagramme de l'air humide va donc évoluer sur une isenthalpe (droite de saturation adiabatique): la chaleur perdue par refroidissement est entièrement compensé par l'apport de l'enthalpie de la vapeur d'eau composée d'un terme dû à sa formation par évaporation et d'un terme beaucoup plus faible dû à son réchauffement (l'échauffement du solide est négligeable dans cette phase si les températures de l'air ne sont pas trop élevées).

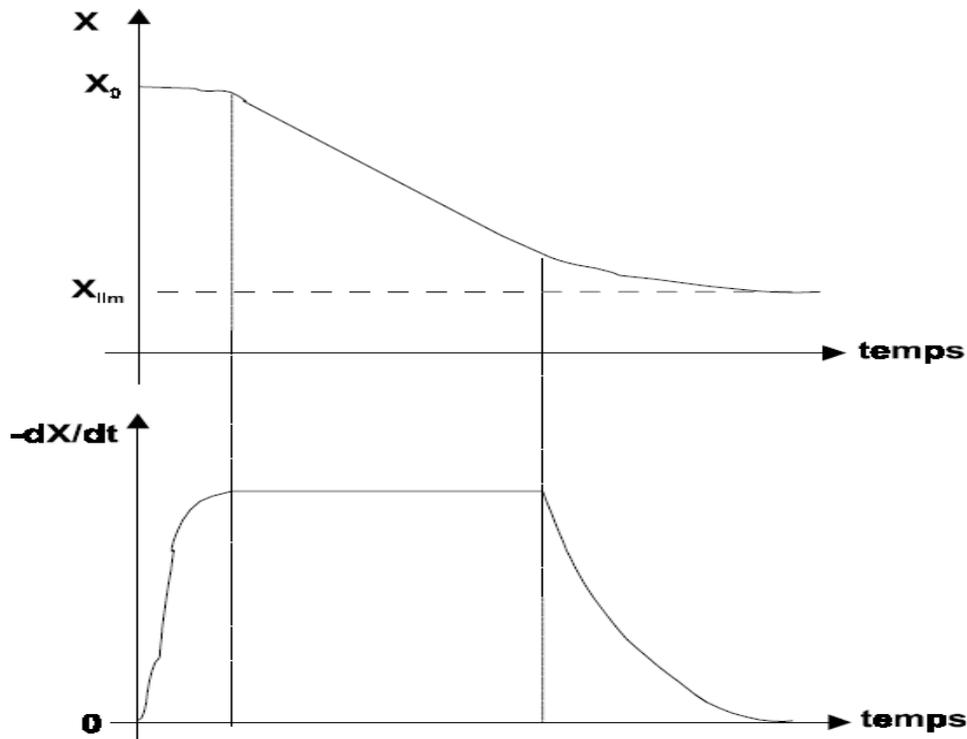
Pendant cette période **la température du solide reste constante et égale à la température humide de l'air**.

Remarque: On montre que dans le cas de l'eau, la température humide est égale à la température de saturation adiabatique de l'air.

Les facteurs qui augmentent la cinétique sont:

- la diminution de l'humidité absolue de l'air de séchage
- l'élévation de la température de l'air de séchage
- l'augmentation du coefficient de transfert thermique par une augmentation de la vitesse de circulation de l'air

- l'augmentation de la surface spécifique du solide ce qui entraîne une augmentation de la surface d'échange Pendant cette période la nature du solide et sa structure interne (pores, interstices) n'interviennent pas.



En fait l'air n'atteint jamais la température de saturation adiabatique puisque la vitesse commence à décroître à partir d'une humidité X_c (humidité critique) et finit par tendre vers une vitesse nulle. Pendant cette période la tension de vapeur du liquide imprégnant le solide est inférieur à celle existant pour un liquide seul présent.

L'humidité superficielle n'est plus renouvelée assez rapidement car le séchage progressant, il faut alors éliminer l'eau provenant de l'intérieur du solide: le trajet de la vapeur d'eau vers la surface devient de plus en plus long et les phénomènes de diffusion deviennent cette fois limitant. Cette diffusion devient d'autant plus lente qu'un phénomène de croûtage apparaît parfois en surface. La vitesse s'annule quand l'humidité du solide devient égale à X_{lim} ce qui correspond à une valeur d'équilibre pour l'air de séchage utilisé.

Pendant cette phase les conditions opératoires liées à l'air perdent de leur importance. On assiste à un échauffement du solide.

II.4.2 Séchage par conduction:

a) Généralités:

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher: le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition.

Les vapeurs formées sont soit aspirées (cas du séchage sous pression réduite qui abaisse la température d'ébullition), soit entraînées par un gaz de balayage dont le débit est très faible par rapport à celui utilisé dans le cas d'un chauffage par convection. La couche de solide en contact avec la paroi est d'abord séchée puis il y a ensuite une augmentation de l'épaisseur de la couche sèche en cours d'opération.

Ce type de séchage est intéressant quand on souhaite récupérer le solvant évaporé pour le récupérer (pour le recycler ou pour éviter le rejet d'effluents polluants). En effet la condensation d'un solvant est toujours beaucoup plus facile quand il n'est pas mélangé à un gaz.

Le séchage sous pression réduite permet de traiter des produits facilement oxydables à une température élevée. Il est aussi très intéressant pour le séchage des substances thermosensibles qui ne supporteraient pas longtemps une température élevée.

b) Processus:

On retrouve comme pour le séchage par convection deux périodes dans le cas d'un séchage discontinu:

- dans un premier période la vitesse de séchage est constante; la transmission de chaleur par conduction est alors suffisamment rapide pour compenser la chaleur perdue par la vaporisation du liquide.
- dans une seconde période la vitesse de séchage ralentit. Le séchage ayant progressé, l'humidité du solide diminue ce qui provoque aussi une diminution de la tension de vapeur du liquide imprégnant le solide (elle devient inférieure à celle de l'air saturé). Dans ces conditions la température d'ébullition augmente ce qui diminue la vitesse de séchage pour un apport de chaleur constant par conduction.

De plus le coefficient de transfert dans le solide devient de plus en plus faible car l'épaisseur de la couche sèche augmente.

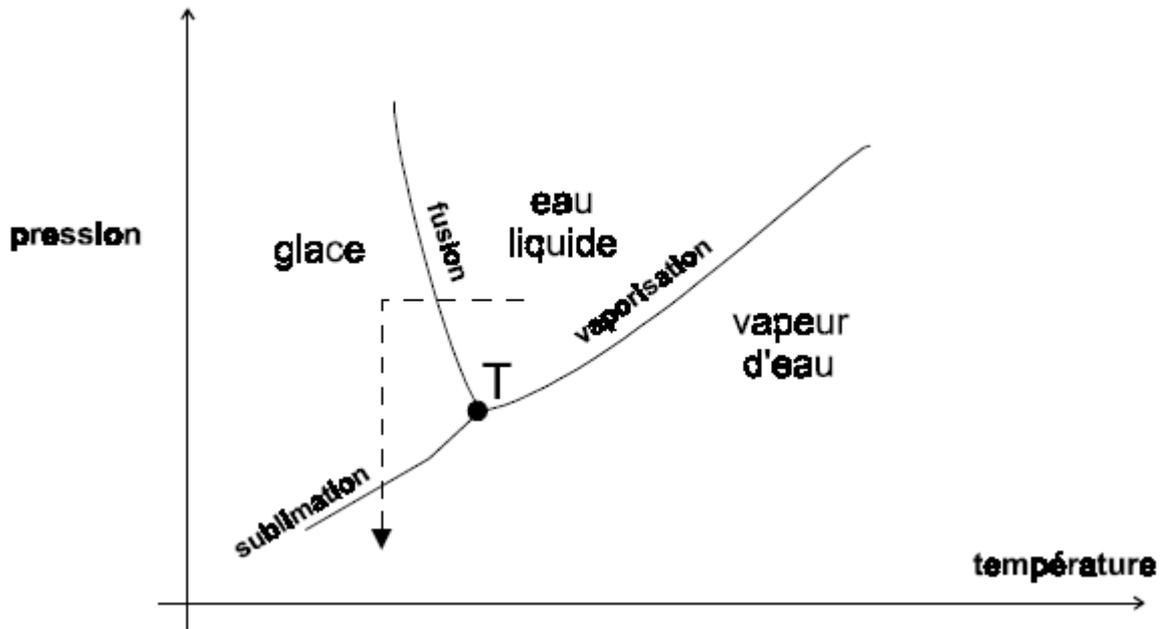
II.4.3 Séchage par lyophilisation :

Certains produits alimentaires ou pharmaceutiques d'origine animale ou végétale doivent être déshydratés pour le stockage et le transport. Le séchage par un procédé classique entraîne la migration des composés solubles de l'intérieur des cellules vers la périphérie des produits en même temps que l'évaporation de l'eau. Cette concentration des composés solubles à la périphérie provoque une redissolution sélective à la réhydratation et donc une dégradation de la qualité des produits. De plus les composés naturels ne supportent parfois aucun apport de chaleur sous peine d'être détruits (vitamines). La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace sans passer par la phase liquide.

Le procédé peut être expliqué sur la figure suivante. On refroidit la substance à des températures de l'ordre de -10 à -40 °C très rapidement pour obtenir des cristaux de glace de petite taille (la sublimation suivante est alors facilitée). On abaisse ensuite la pression en dessous du point triple (entre 100 et 10 pascals) de façon à permettre la sublimation de cristaux: on évite ainsi la formation d'eau liquide intermédiaire. La sublimation se poursuit jusqu'au produit sec tant qu'on maintient une pression suffisamment faible au-dessus du produit.

La récupération de la vapeur d'eau s'effectue soit par condensation sur une paroi refroidie à -40 °C avec formation de glace et élimination de celle-ci par un racloir, soit par action d'un déshydratant (P₂O₅, CaCl₂ ...). L'aspiration des vapeurs par la pompe à vide est impossible en raison de l'énorme volume de la vapeur d'eau dégagée sous ces pressions; la pompe à vide n'élimine donc que les incondensables.

La lyophilisation est un procédé coûteux (production des frigories, utilisation du vide) qui est donc réservé à des produits alimentaires ou particulièrement onéreux: jus de fruits, lait, plasma sanguin, antibiotiques...



II.5 Mécanismes intervenant au cours du séchage:

II.5.1 Transferts de chaleur :

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une **source d'énergie extérieure** au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur : convection - conduction – rayonnement. Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux.

II.5.2 Séchage par convection :

En séchage industriel, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques.

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = \alpha A (T_a - T_s) \quad (1)$$

Avec Q (W) quantité de chaleur transférée par unité de temps,

A (m^2) surface d'échange, $T_a - T_s$ (K) écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température superficielle du produit à sécher, α ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) coefficient d'échange par

convection. L'application au séchage de cette formule appelle les quelques remarques ci-après.

D'après la formule (1), la quantité d'énergie transférée au produit à sécher est d'autant plus importante que la surface de transfert est, elle-même, importante. Donc la **diminution de la taille des particules** constituant le produit sera un facteur d'amélioration du séchage. De plus, elle facilitera la diffusion de l'humidité vers la surface des particules.

L'écart ($T_a - T_s$) n'est pas constant le long du sécheur. En effet, la température du produit augmente généralement au cours du séchage, alors que celle des gaz de séchage diminue. L'intégration de cet écart sur toute la durée du séchage en considérant α constant conduit à exprimer la quantité de chaleur échangée en fonction de la moyenne logarithmique des écarts de température à l'entrée et à la sortie de l'appareil. D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température entre le gaz et le produit est augmentée. Toutefois, la thermosensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter) limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage.

Le coefficient d'échange α peut être estimé grâce à des relations faisant intervenir des **nombres adimensionnels** tenant compte des propriétés du gaz de séchage ainsi que de celles du produit à sécher. Dans le cas de particules dont le diamètre est inférieur à 10 mm, le coefficient d'échange par convection α peut être calculé à partir du **nombre de Nusselt** :

$$Nu = \alpha dp / \lambda_a$$

Avec λ_a conductivité thermique de l'air, grâce à la relation

$$Nu = C Re^m Pr^n$$

Où Re est le **nombre de Reynolds**

Pr est le **nombre de Prandtl**, égal à 0,7 dans le cas de l'air,

C est une constante ajustée expérimentalement (valeur proche de 2), m est proche de 0,8 et n de 0,5.

Re étant proportionnel à la vitesse de l'air à travers le sécheur, l'augmentation de celle-ci a pour effet d'accroître Nu donc le coefficient α ; cette vitesse est toutefois limitée par le risque d'un entraînement exagéré du produit hors du sécheur.

II.5.3 Séchage par conduction

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais **par contact direct entre le produit et une paroi chauffée**. Les vapeurs libérées par le séchage sont soit aspirées (séchage par ébullition), soit entraînées par un **gaz de balayage** dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif. Ce type de sécheur est donc très intéressant lorsque l'on désire réduire la quantité d'effluents gazeux rejetés.

Le flux thermique (en W/m²) est donné par la relation :

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dT_s}{dl}$$

Avec λ (W · m⁻¹ · K⁻¹) conductivité thermique de la pellicule de produit ou de gaz à travers laquelle s'effectue le transfert,

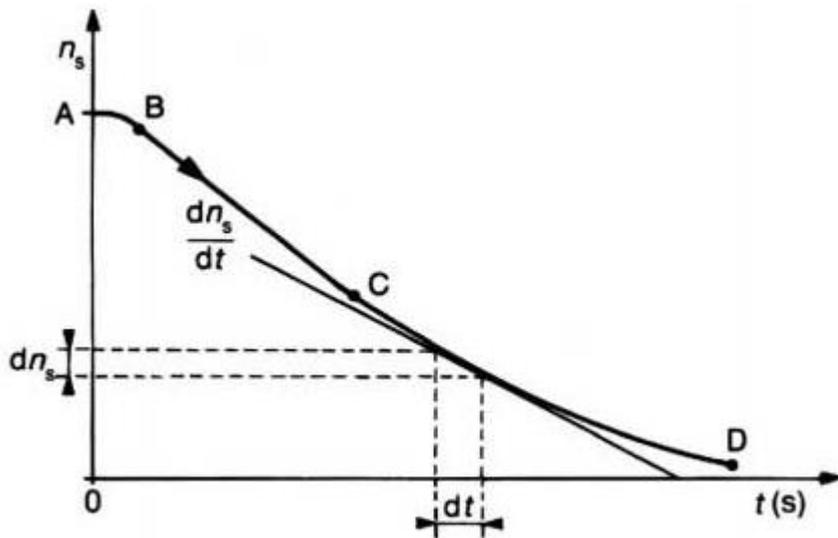
$\frac{dT_s}{dl}$ (K · m⁻¹) : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

II.6 Différentes étapes du séchage d'un produit humide :

II.6.1 Obtention des courbes de séchage et interprétation :

La courbe de séchage par entraînement d'un produit granulaire peut être obtenue en disposant celui-ci en couche mince (1 à 3 cm) sur une claie perforée. On fait traverser celle-ci par un courant d'air chaud dont le taux d'humidité et la température sont contrôlés et maintenus constants. Le taux d'humidité du produit est mesuré à intervalles de temps réguliers ou éventuellement en continu.

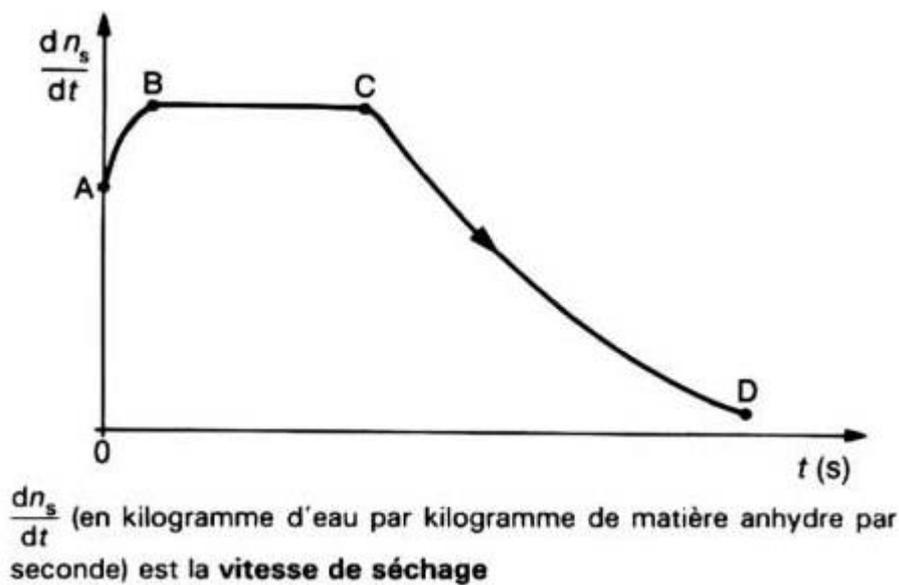
En portant le taux d'humidité du produit ns (rapporté à la matière anhydre) en fonction du temps t, on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur la figure 1.



n_s (en kilogramme d'eau par kilogramme de matière anhydre) est le **taux d'humidité** du produit à sécher.

Figure 1 – Courbe de séchage $n_s = f(t)$

On constate que la courbe de séchage ainsi définie présente différentes parties qu'il est possible de mieux mettre en évidence en utilisant un autre mode de représentation. En portant les différentes valeurs de la pente de la courbe $n_s = f(t)$ donc la vitesse de séchage $\frac{dn_s}{dt}$ en fonction du temps, on peut obtenir une nouvelle courbe dont l'allure est donnée sur la figure 2.



$\frac{dn_s}{dt}$ (en kilogramme d'eau par kilogramme de matière anhydre par seconde) est la **vitesse de séchage**

Figure 2 – Courbe de séchage $\frac{dn_s}{dt} = f(t)$

Krischer a proposé un autre mode de représentation : la vitesse de séchage $\frac{dn_s}{dt}$ en fonction du taux d'humidité n_s conduit à la courbe représentée sur la figure 3.

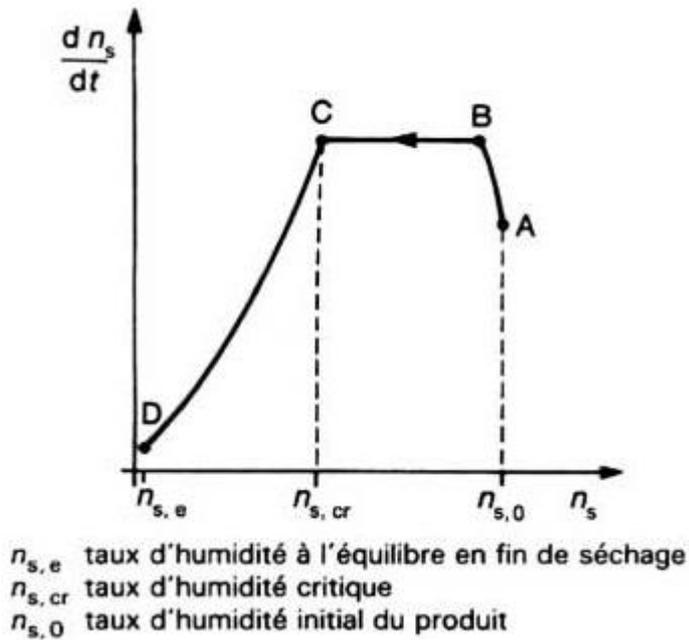


Figure 3 – Courbe de séchage

Ces 3 types de représentation mettent en évidence l'existence de plusieurs phases pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables. Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue :

On peut imaginer la plupart des corps à sécher comme étant constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (figure 4).

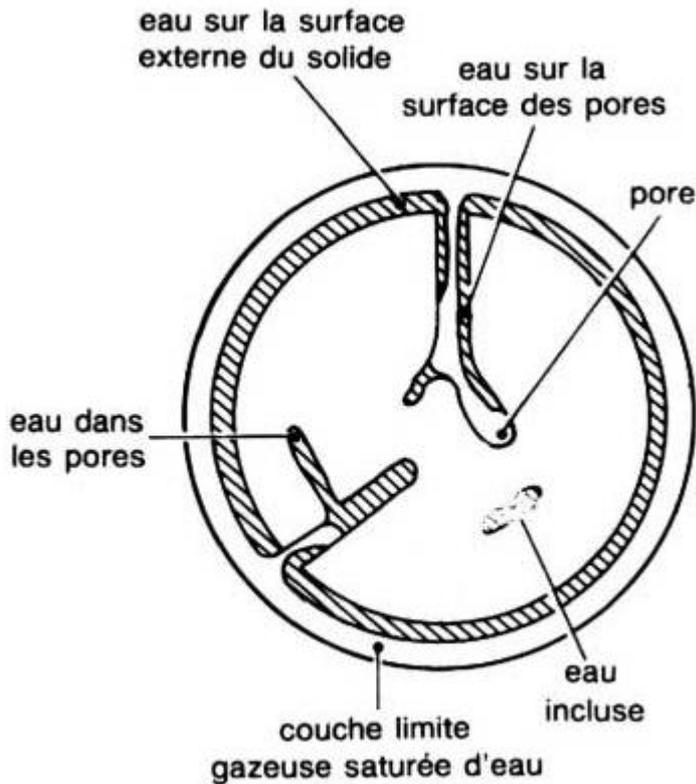


Figure 4 – Représentation schématique d'un solide humide

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique au produit à sécher et dont la source est extérieure à celui-ci. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau.

II.6.2 Phase à vitesse de séchage constante :

Pendant toute la durée de cette phase qui se poursuit jusqu'au point critique, la surface du produit est saturée en eau. Il s'y forme une couche limite de gaz où la pression de vapeur d'eau est quasi égale à celle de l'eau pure dans les mêmes conditions de température et de pression. Cette situation résulte soit de la présence d'eau en quantité importante à la surface du produit, soit d'une diffusion d'eau, du sein du produit vers sa surface externe, suffisamment rapide. Cette phase est comparable à l'évaporation d'un liquide. La température du solide reste constante et égale à la température dite **humide** du fluide de séchage. La nature du solide n'intervient pas au cours de cette période, par contre la forme du solide peut influencer sur la **vitesse de séchage** (en $\text{kg d'eau} \cdot \text{s}^{-1}$) qui, pendant cette phase, est égale à:

$$\frac{dW}{dt} = M \frac{dn_s}{dt} = K_G A (P_s - P_W)$$

Avec M (kg) masse du produit à sécher,

A (m²) surface à travers laquelle s'opère le transfert d'humidité,

P_s (Pa) pression de vapeur d'eau à la température T à la surface du solide pendant la phase à vitesse constante, cette pression est égale à la pression de vapeur saturante à la température du solide ou température humide,

P_w (Pa) pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air,

K_G(s · m⁻¹) coefficient global de transfert de matière, défini par la relation suivante :

$$K_G = \frac{h_G}{R_W T} = \frac{P}{P - P_{DM}}$$

$$P - P_{DM} = \frac{P_{DO} - P_{DL}}{\ln \frac{P - P_{DL}}{P - P_{DO}}}$$

R_w est une constante caractéristique de l'eau, égale à la constante molaire des gaz R divisée par la masse molaire de l'eau.

P_{DO} et P_{DL} et P sont respectivement la pression de vapeur d'eau au niveau de la surface du produit à traiter, la pression partielle de l'eau dans l'air et la pression dans l'enceinte de séchage. Dans la plupart des cas, P_{DM}, pression de vapeur d'eau moyenne au cours de séchage, est négligeable devant P; par conséquent, on a :

$$K_G = \frac{h_G}{R_W \cdot T}$$

h_G (m · s⁻¹) est le coefficient d'échange de matière par diffusion à travers la couche limite ; il peut être déterminé expérimentalement. Il existe aussi pour évaluer ce coefficient, des relations faisant intervenir les **nombres adimensionnels**.

$$h_G \text{ peut être calculé par la relation : } h_G = Sh \frac{D_V}{d_p} = \frac{P - P_{DM}}{P}$$

Dans laquelle le nombre de Sherwood a la valeur calculée à l'aide de la relation le plus couramment utilisée pour des solides granulaires :

$$Sh = 2 + C \cdot Re_p^{1/2} Sc^{1/3}$$

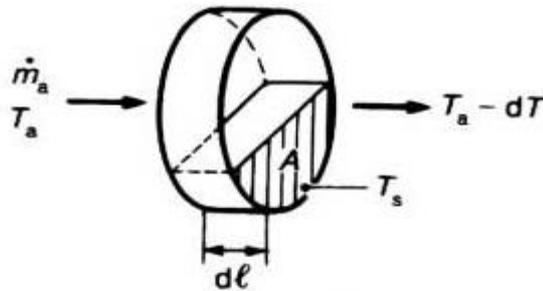
II.6.3 Durée de séchage :

Pendant la phase à vitesse constante peut être calculée, pour un sécheur donné fonctionnant en continu, en effectuant un bilan sur un élément de longueur de l'appareil (figure 5). Sur un élément de surface frontale A de volume élémentaire A . dl et de masse A . dl . ρ_{app}, la **vitesse de séchage** est égale à :

$$M. \frac{dn_s}{dt} = \frac{\dot{m}_a c_{pa} dT}{\lambda_e} \frac{1}{A. dl. \rho_{app}} = \frac{h. a}{\rho_{app} \cdot \lambda_e} (T_a - T_s)$$

Avec \dot{m}_a (Kg . S⁻¹) débit massique d'air de séchage.

c_{pa} (j . Kg⁻¹ . K⁻¹) capacité thermique massique de l'air.



L'air de séchage entre à la température T_a et au débit massique \dot{m}_a et ressort à la température $T_a - dT$.

Figure 5 – Représentation schématique d'un élément du sécheur, d'épaisseur dl et à la température T_s

L'intégration de cette équation différentielle permet de calculer la **durée du séchage** pendant la phase à vitesse constante, à partir des taux d'humidité définis sur la (figure 3). On obtient :

$$t = \frac{\rho_{app} (n_{s,0} - n_{s,cr}) \lambda_e}{h. a. (T_a - T_s)_{ml}}$$

Avec

$$(T_a - T_s)_{ml} = \frac{(T_{a,1} - T_{s,0}) - (T_{a,2} - T_{s,a})}{\ln \frac{(T_{a,1} - T_{s,0})}{(T_{a,2} - T_{s,a})}}$$

$(T_a - T_s)_{ml}$: Moyenne logarithmique des écarts de température entre l'air (indice a) et le solide (indice s), respectivement à l'entrée du sécheur (indice 1) et à la fin (indice 2) de la zone où s'effectue le séchage de l'eau libre.

Chapitre III : Evaporation

III. Evaporation

III.1 Introduction :

L'évaporation, c'est le passage de l'état liquide à l'état vapeur. Nous englobons dans ce même concept la vaporisation calme en surface d'un liquide et celle avec formation de bulles dans la masse que l'on appelle ébullition. De même, nous ne ferons pas de distinction entre les bouilleurs et les rebouilleurs. Plus généralement, l'évaporateur est l'appareil, ou l'ensemble d'appareils, destiné à réaliser l'évaporation, c'est-à-dire le passage de tout ou partie d'un liquide à l'état de vapeur.

L'évaporation peut se limiter à un simple changement de phase d'un liquide pur dont la composition ne change pas. Ce phénomène permet le transfert de chaleur d'un fluide à un autre et l'absorption d'énergie dans des conditions de température et de pression constantes pour le fluide vaporisé. C'est le cas des chaudières ou des vaporiseurs de gaz liquéfiés qui interviennent dans certains procédés et, en particulier, dans les pompes à chaleur à compression. L'évaporation peut avoir pour objet la vaporisation du solvant d'une solution qui, de ce fait, s'enrichit en soluté à mesure que le solvant s'élimine. Il y a donc concentration du produit dissous dans la phase liquide. En fin d'opération, on récupère ce que l'on appelle le concentrat.

III. 2 Facteurs principaux influençant l'évaporation:

Toutes les applications de l'évaporation ne peuvent pas être résolues par un seul type d'appareil. Il faut donc adapter les évaporateurs aux facteurs dont les principaux sont :

III.2.1 Température d'ébullition élevée :

Certaines solutions ont une température d'ébullition très supérieure à celle de l'eau à la même pression (soude caustique, acide sulfurique...). Le chauffage de l'évaporateur par la vapeur d'eau doit se faire à des pressions très élevées. Pour cette raison, on préfère parfois d'autres moyens de chauffage (fluides thermiques, sels fondus, chauffage par induction).

III.2.2 Production de mousses

Dans le processus d'évaporation, il est indispensable de veiller à ce que la vapeur séparée entraîne avec elle le moins de liquide possible. Cela est réalisé dans presque tous les types de séparateurs de vapeur. Il suffit que ces séparateurs soient assez largement dimensionnés pour

que la vitesse ascendante de vapeur soit inférieure à la vitesse de chute libre des particules de liquide pouvant être mises en suspension dans la vapeur.

Si le liquide traité mousse, la vapeur séparée se présente sous forme de bulles discontinues enfermées dans une pellicule de liquide. Ces bulles, très légères, sont entraînées et la quantité de liquide qui accompagne ainsi la vapeur peut être si importante qu'elle rende l'évaporateur inapte au service demandé.

III.2.3 Sensibilité à la température : Certains produits, les corps organiques principalement, sont décomposés s'ils sont soumis à une température trop élevée.

III.2.4 Viscosité élevée : L'élévation de température des solutions permet de diminuer la viscosité dans bien des cas, mais il arrive que les solutions soient à la fois visqueuses et sensibles à la température.

III.2.5 Précipitation de sels : Lorsque l'évaporation provoque une cristallisation, il faut veiller à ce que les appareils permettent d'éviter le dépôt de sel cristallisé sur les surfaces d'échange ou sur les parois du cristalliseur.

III.2.6 Corrosion : À l'origine, la plupart des évaporateurs étaient construits en matériaux communs. La fonte, presque exclusivement employée pour la construction des tout premiers évaporateurs, a fait place, dans bien des cas, à l'acier, plus facile à travailler. L'acier ordinaire ne présente toutefois pas une résistance suffisante à la corrosion dans la plupart des cas.

III.2.7 Entartrage : Certaines solutions, dites incrustantes, ont tendance à entartrer les surfaces d'échange, c'est-à-dire à y déposer des sels mauvais conducteurs de la chaleur qui réduisent l'efficacité de l'échange. Les sels entartrants sont des sels à solubilité inverse, c'est-à-dire des sels dont la solubilité diminue lorsque la température augmente. Pour ces sels, c'est donc au contact de la paroi chauffante, où la température est maximale, que la solubilité est minimale. Il en résulte une précipitation des sels sur la paroi d'échange, généralement sous forme de tartre dur, dense et fortement adhérent.

III. 3. Calcul des évaporateurs

III.3.1 Bilan matière

Le bilan matière d'un évaporateur est relativement simple à établir puisqu'il répond à l'équation suivante : solution d'alimentation = solution concentrée + eau évaporée

Dans le cas de précipitation de sel, il faut tenir compte de la phase solide et écrire : solution d'alimentation = solution concentrée + sel précipité + eau évaporée.

Remarque importante : le bilan matière doit toujours être établi **en masse** ; les calculs sur les volumes sont entachés d'erreurs dues aux variations de densité intervenant au cours de la concentration. Ces erreurs sont très souvent importantes.

III. 3.2 Bilan énergétique

Pour établir le bilan énergétique, on écrit l'égalité de l'énergie thermique totale des éléments entrants et de celle des éléments sortants (principe de la conservation de l'énergie totale).

On a donc à considérer :

— à l'entrée:

- l'enthalpie massique totale des solutions d'alimentation : H_{la} ,
- l'enthalpie massique totale de la vapeur de chauffage : H_{vc} ;

— à la sortie :

- l'enthalpie massique totale des solutions concentrées : ,
- l'enthalpie massique totale de la vapeur d'évaporation : H_{ve} ,
- l'enthalpie massique totale de l'eau condensée provenant de la vapeur de chauffage :

$$H_c = J T_c$$

avec T_c : température de condensation de la vapeur de chauffage, J : capacité thermique massique de l'eau = 4,18 kJ/(kg · K),

— la chaleur perdue à l'extérieur du système.

D'autres éléments particuliers peuvent intervenir dans le bilan, comme l'enthalpie totale du sel précipité, l'enthalpie de cristallisation, l'enthalpie de concentration des solutions, la chaleur de surchauffe de la vapeur, l'énergie thermique apportée sous forme mécanique (pompes, agitateurs...). Ces éléments sont, dans bien des cas, négligeables, encore faut-il le vérifier à chaque calcul.

III.4 Différents types d'évaporation :

III.4.1 Évaporateurs naturels : Lorsqu'une solution aqueuse est exposée à l'air, elle tend à se vaporiser jusqu'à saturer l'air ambiant en eau. C'est le principe appliqué pour l'évaporation naturelle, dite évaporation solaire, telle qu'on la trouve toujours mise en pratique dans les marais salants.

III.4.2 Évaporateurs à feu nu : Un autre moyen d'augmenter l'évaporation naturelle est d'élever la température des solutions à évaporer. La pression de vapeur augmentant avec la température, l'évaporation est ainsi activée.

III.4.3 Évaporateurs à détente étagées : Ces évaporateurs consistent à soumettre une circulation de solution réchauffée à des détente successives sous des pressions décroissantes. La vapeur d'évaporation libérée dans les différents étages de détente est utilisée au réchauffage de la solution. Un chauffage complémentaire par de la vapeur d'eau apporte la chaleur nécessaire au maintien de l'équilibre du système.

III.4.4 Évaporateurs à double enveloppe ou à serpentins

III.4.5 Évaporateurs chauffés à la vapeur et à surface d'échange tubulaire

III.4.6 Évaporateurs à plaques

III.4.7 Évaporateurs à chauffage spécial

III.5 Différents circulations

III.5.1 Alimentation en parallèle

Chaque effet est alimenté séparément en quantité suffisante pour compenser l'évaporation et l'extraction. Ce mode d'alimentation est rarement utilisé. On le rencontre dans les appareils de cristallisation. Il ne présente pas d'autre avantage que la commodité.

III.5.2 Alimentation à courants parallèles

C'est la méthode la plus répandue. Elle consiste à introduire la solution à concentrer au premier effet et à alimenter chaque effet à partir du précédent, l'extraction de solution concentrée se faisant au dernier effet.

L'avantage de ce mode d'alimentation, appelé à courants parallèles parce que la solution circule dans le même sens que la vapeur, est que la circulation des solutions se fait naturellement sous l'action de la chute de pression qui existe entre chaque effet et son suivant. L'inconvénient de la circulation à courants parallèles est que, si la solution d'alimentation est froide, il faut la réchauffer à la température du premier effet.

III.5.3 Alimentation à contre-courant : La circulation à contre-courant consiste à introduire la solution à évaporer au dernier effet et à la faire progresser d'effet en effet à l'aide de pompes pour sortir la solution concentrée au premier effet.

Dans le cas où la solution d'alimentation est froide, la circulation à contre-courant donne la consommation de vapeur minimale car le réchauffage est effectué de façon méthodique par la vapeur ayant déjà été utilisée dans les effets précédents. Si la solution introduite est à une température supérieure à la température d'ébullition au dernier effet, on perd cet avantage car l'eau contenue dans la solution s'évapore par détente et la vapeur ainsi produite est perdue dans le condenseur. Il faut ensuite réchauffer à nouveau la solution qui a été inutilement refroidie.

III.5.4 Comparaison et choix :

Le choix d'une méthode d'alimentation dépend des conditions d'utilisation :

- température d'alimentation ;
- température souhaitée pour les solutions concentrées (un appareil à courants parallèles n'est pas recommandé si l'on a besoin de solutions concentrées chaudes) ;
- viscosité des solutions : on a intérêt à choisir un appareil dans lequel la solution la plus concentrée est à la température la plus élevée, pour réduire les effets de la viscosité ;
- sensibilité à la température : les solutions thermosensibles le sont d'autant plus que la solution est plus concentrée. Par exemple, pour les jus sucrés, la marche à courants parallèles s'impose pour cette raison ;
- élévation de température d'ébullition : si la concentration provoque une augmentation importante de la température d'ébullition, il faut proscrire l'alimentation en parallèle qui donnerait la surébullition maximale à chaque effet. Il vaut mieux adopter la circulation à contre-courant qui reporte la surébullition maximale au premier effet et permet de faire fonctionner les autres effets sous la pression minimale. Précisons, pour terminer, que toute solution d'alimentation mixte est envisageable.

III.6 Calcul de la surface d'échange :

Le calcul de la surface d'échange se fait par la formule fondamentale :

$$A = \Phi / K \Delta T$$

Φ , flux thermique à transmettre.

ΔT : L'écart de température est choisi soit en fonction des conditions locales (pression de la vapeur disponible), soit en fonction de l'appareil choisi (simple ou multiple effet), soit en fonction du produit à évaporer (en tenant compte de sa sensibilité à la température).

K : Le coefficient de transmission thermique peut être calculé, mais les calculs restent assez imprécis, si bien que les constructeurs d'évaporateurs préfèrent encore souvent choisir K par expérience, par comparaison avec des cas similaires ou par extrapolation des résultats d'une installation pilote. Le coefficient global retenu doit, évidemment, tenir compte de l'encrassement éventuel de la surface d'échange, ainsi que de l'écart de température et de la température de fonctionnement.

III. 5 Simple effet et multiple effet :

L'évaporateur classique est chauffé par de la vapeur qui se condense sur une surface d'échange et celle-ci transmet son enthalpie de vaporisation à la solution en ébullition qui se trouve de l'autre côté de la surface d'échange. La solution émet à son tour de la vapeur qui peut :

- soit être condensée dans un condenseur (simple effet) ;
- soit être utilisée au chauffage d'un autre évaporateur identique au premier et fonctionnant à une température inférieure (multiple effet).

On peut ainsi associer en série un nombre théoriquement illimité d'évaporateurs pour former un multiple effet. Pratiquement, le nombre d'effets est limité par la pression de la vapeur initiale de chauffage, par des problèmes de construction et par la température d'ébullition de la solution sous la pression choisie. Le nom de multiple effet a été donné à ce type d'appareils parce que la vapeur initiale (vapeur de chaudière) accomplit plusieurs fois son effet. De la définition du multiple effet, il résulte que :

- le seul circuit de vapeur permet de connaître le nombre d'effets d'un évaporateur ;
- les différents effets sont habituellement numérotés dans le sens du circuit de vapeur, compte non tenu du mode de circulation adopté pour le liquide.

Par exemple, si une solution est concentrée successivement dans deux appareils chauffés tous deux par la vapeur de chaudière, on a affaire à deux simples effets et en aucun cas à un double effet.

Fiche TD II : Séchage

SERIE N°2

Exercice n°1 :

Calcul de la vitesse d'évaporation d'une pellicule d'eau située à la surface d'un grain de sable de 4 mm de diamètre. L'épaisseur de la pellicule est égale à 0,5 mm. On considère que ce grain est introduit dans un courant d'air dont la température est égale à 40 °C et l'humidité relative 22 %. La vitesse relative du grain par rapport à l'air est égale à 5 m/s.

Exercice n°2 :

On se propose de sécher du CaF_2 de 6 à 0,5% d'humidité à 2000 lb/h avec de l'air à contre-courant dans un séchoir rotatif.

L'air de chauffage entre à 260°F, une humidité de 0,03 et une température humide de 154°F.

Les solides ont une chaleur spécifique de 0,48Btu /lb-°F et entrent à 70°F et quittent le séchoir à 150°F.

Le flux maximal permis de l'air est de 2000lb/ft².h

Calculer D et L si le nombre d'unités de transfert N_t est égal à 2,2 sachant que :

$$N_t = \frac{T_{ha} - T_{hb}}{\Delta T} = \frac{T_{g1} - T_{g2}}{\Delta T}$$

Corrigé de la série n°2

Exercice n°1 :

Température du thermomètre humide ($t_h = 22,2 \text{ °C}$) égale à la température de surface du grain
pression de vapeur d'eau à la surface du solide :

$$P_W = 16 \text{ mbar} = 1\,600 \text{ Pa}$$

Or $P_s = 2\,700 \text{ Pa}$ (pression de vapeur saturante de l'eau).

On prend comme diamètre de la particule le diamètre du grain augmenté de deux épaisseurs de pellicule, soit 5 mm. On calcul

$$Sh = 21,57$$

$$P - P_{DM} = 99147$$

$$h_G = 0,116 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$k_G = 8,02 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$$

La vitesse de séchage s'élève donc à :

$$\frac{dW}{dt} = M \frac{dn_s}{dt} = K_G A (P_s - P_W)$$

$$\frac{dW}{dt} = 6,93 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

La masse d'eau (liquide) autour du grain étant trouvée égale à $3,2 \times 10^{-5} \text{ kg}$, le temps de séchage sera :

$$t = 462 \text{ S}$$

Exercice n°2 :

Pour un séchoir rotatif, \dot{q} = le flux spécifique de chaleur nécessaire pour éliminer 1Kg de vapeur

$$\dot{q} = 0,125 \pi \cdot L \cdot D \cdot G^{0,67} \cdot \overline{\Delta T}$$

$$L = 12,98 \text{ m}$$

$$D = 1,9 \text{ m}$$

$$\overline{\Delta T} = 61,77 \text{ °F}$$