

# CHI Thermodynamique de l'air humide

هذا الحور يتعلق بدراسة الهواء الرطب

$$Y = 0,007 \text{ Kg eau / Kg a.s}$$

Air humide } Air sec  
                  } Vapeur d'eau

Air sec mélange de gaz parfait ( $N_2, O_2, CO_2, \dots$ ) à proportion fixe

## 1) Introduction :

- \* L'air humide ou l'air atmosphérique est un mélange à proportions variables, d'air sec et de vapeur d'eau.
- \* L'air sec lui-même est un mélange de gaz parfaits ( $N_2, O_2, \dots$ ) mais à proportions invariables.
- \* L'air sec est caractérisée par :

$\rho$  : La masse volumique,  $C_p$  : chaleur massique,  $\lambda$  : Conductivité

$\mu$  : Viscosité dynamique,  $H_a$  : Enthalpie, fonction d'état

## Remarque :

L'air sec transparent au rayonnement s'il est exempt de poussière ou autres solide.

Permette caractéristiques de l'air humide (L'AH) :

Considérons un volume "V" d'air humide à la température "T" et la pression "P"

$$\left. \begin{aligned} P &= P_v + P_a \\ M &= m_v + m_a \end{aligned} \right\} V, T$$

A

2020 sept 20

$P$  : pression totale

$P_v, P_a$  : pression partielles de la vapeur d'eau et de l'air sec

$M$  : masse d'air humide

$m_v, m_a$  : masse de vapeur et de l'air sec

2.1) humidité absolue  $\equiv$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{Rapport de mélange} \\ \text{titre en eau} \\ \text{teneur en eau} \end{array} \right.$

$$Y = \frac{m_v}{m_a} \left[ \text{kg eau / kg a.s} \right]$$

Remarque : La mesure directe de cette grandeur est difficile, elle nécessite une installation très sophistiquée ("banc gravimétrique")

2.2) Pression de vapeur saturante  $P_s [T]$

C'est la limite de pression partielle de vapeur à "T" avant un changement de phase (vapeur  $\xrightarrow{\text{condensation}}$  liquide)

2.3) Humidité relative (HR%) :

$$HR = \frac{P_v}{P_s(T)} \times 100 [\%]$$

C'est le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau à la pression de vapeur saturante à la température "T"

L'appareil de mesure de HR est appelé "hygromètre" il existe 2 types

\* hygromètre mécanique

\* hygromètre à impédance

8/12/20

H<sub>2</sub>O → 600  
65

MEMO

## Séchage thermique

27/02/2020

### Diagramme de l'air humide

1.2.4 Température sèche  $T_s$  c'est la température mesurée par un thermomètre à bulbe sec (température courante donnée par la météo)

1.2.5 Température humide  $T_h$  c'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air.

mesure de  $T_h$ : psychromètre à aspiration (A voir H.W)

1.2.6 Température de rosée  $T_r$  c'est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation, l'humidité absolue restant constante pendant le refroidissement

Elle est telle que:  $P_r = P_{sat} [T_r]$

Applications - Cas de climatisation  
- Cas de séchage

1.2.7 Enthalpie spécifique  $H$  (KJ / Kg<sub>as</sub>)

c'est la chaleur totale contenue dans l'air humide. (origine de  $H$  correspond à l'air sec à 0°C), Elle est rapportée à 1 kg d'air sec

Par exemple pour faire passer de l'air humide contenant la masse  $m_a$  d'air sec de l'état  $\underline{A} (T_A, Y_A)$  à  $\underline{B} (T_B, Y_B)$ , l'énergie fournie est:

$$E = (H_B - H_A) m_a$$

2020 ordo 05

Ø

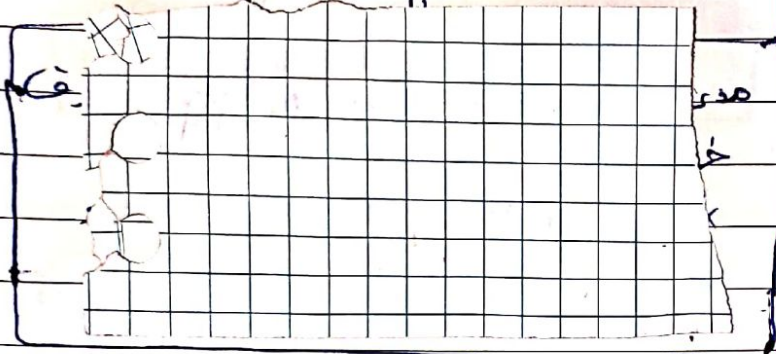
①



2020 oct 12

Corps anhydre

0% taux d'humidité



\* L'extraction, par évaporation, de l'eau d'un produit peut être obtenue par deux mécanismes : l'ébullition ou l'entraînement. Quel que soit le mécanisme, c'est la pression de vapeur d'eau dans le produit qui détermine les échanges entre l'air et le produit.

س: سئل الدعوات ← استعدت الخبث  
إزالة الرطوبة

## Corps hygroscopique

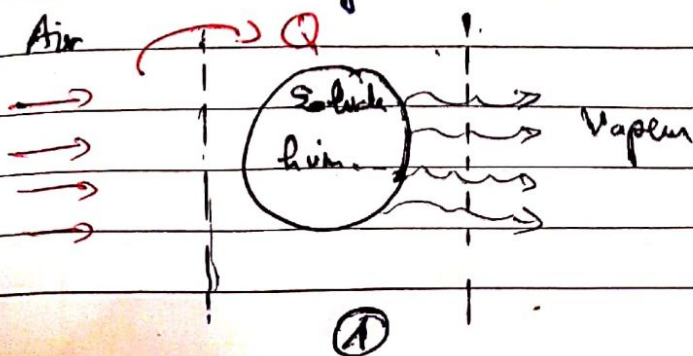
\* C'est un corps qui a une aptitude à absorber de l'humidité du milieu environnant

\* Le comportement hygroscopique est caractérisé par des courbes appelées isothermes de sorption en appelle aussi isothermes de désorption

## 2.2 Principe physique du séchage.

Rq conception de séchoir dépende au deux agent de séchage

Air de séchage et Solide humide



## Ebullition

$$P_{\text{produit}} = P_{\text{total air}}$$

Si on fait du vide partiel →

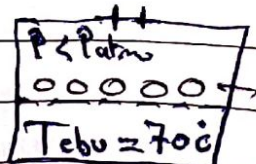
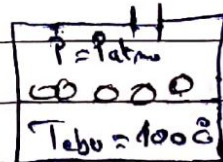
$$P_{\text{tot}} < P_{\text{atm}}$$

$T_{\text{ebull}} \downarrow$

App = séchage sous vide partiel

$$T_{\text{ebu}} < 100^{\circ}\text{C}$$

⇒ séchage convenable pour les produit thermosensible.

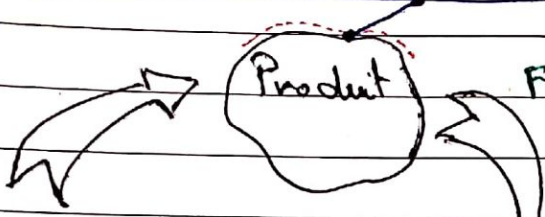


② Drying chamber

2020 oct 12

2.2.1. Séchage par entraînement

Air A\* en contact avec le produit  
 $T = 29^{\circ}C$      $P_v = 4000 Pa$



Air de séchage  
 $T = 80^{\circ}C$      $P_v = 1000 Pa$

Fig. Exemple  
 Débit de séchage  
 d'un produit  
 très hydraté

2.2.2. Périodes et Courbes de séchage

2.2.2.1. Déroulement d'une expérience de séchage en couche mince (Labo)  
 objectif: C'est une expérience de séchage en couche mince, sous condition constantes de  $T_a, V_a, HR_a$  % pour obtenir une courbe de comportement physique d'un produit au cours de séchage.

Lorsque un produit humide est placé dans un courant d'air suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle telle que:

- \* l'air apporte au produit une partie d'énergie nécessaire à la vaporisation
- \* l'eau est évaporée sans ébullition
- sous l'effet de  $\Delta p_v$  la vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit vers le milieu ambiant et est ensuite entraînée par l'air

Pour quoi? :

- \* Couche mince  $\rightarrow$  Pour séchage homogène
- \* conditions constantes  $\rightarrow$  Pour permettre modéliser l'évolution de séchage.

La courbe obtenue est appelée Cinétique de séchage

\*\* Étapes d'une expérience de séchage

① Mesure de la teneur en eau initiale du produit  $\Rightarrow$  Connaître la masse sèche invariable au cours du séchage

\* Méthode de mesure "X<sub>0</sub>"  
 Tech. Ing.: J 2451

Jean Vameur  
 Page 6 et 7

## Détermination de la teneur en eau

### Principe

Ce procédé consiste en un étuvage, à une température et dans des conditions opératoires définies. La perte de masse observée est équivalente à la quantité d'eau présente dans le produit.

### Matériel

- 1 - Balance précise au  $100^{\text{ème}}$  de gramme.
- 2 - Etuve
- 3 - Couteau et/ou coupe-légume
- 4 - Récipients pouvant aller à l'étuve type barquettes aluminium ou verre.

### Méthode

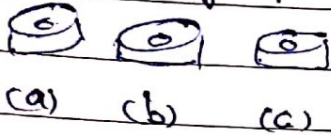
La méthode consiste à râper ou à couper en cubes de 1 cm de côté maximum, au moins 3,5 kg de pomme de terre et à bien mélanger l'ensemble de façon à obtenir un échantillon homogène. A partir de celui-ci, cinq ou six prises d'essai d'environ 4 à 6 grammes sont faites et pesées de produit humide. L'ensemble est mis à l'étuve, à une température stabilisée de  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , pour une durée de  $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ . Les prises d'essai sont sorties à l'étuve puis mises dans un dessiccateur refroidies avant d'être de nouveau pesées.

La matière sèche est calculée suivant la formule :

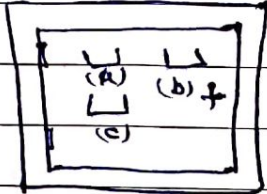
$$M.S (\%) = 100 - \left[ \left( \frac{m_e}{m_h} \right) \times 100 \right]$$

Méthode de pente de poids à l'étuve:

≈ 3 à 5g de produit



Etuve à 105 °C



Mesure

$M_1$  → pesées successives à  $\Delta$  temps réguliers jusqu'à poids = constant  
 (أي قياسات متتالية في الزمن حتى يصبح الوزن ثابتاً)  
 (أي قياسات متتالية في الزمن حتى يصبح الوزن ثابتاً)

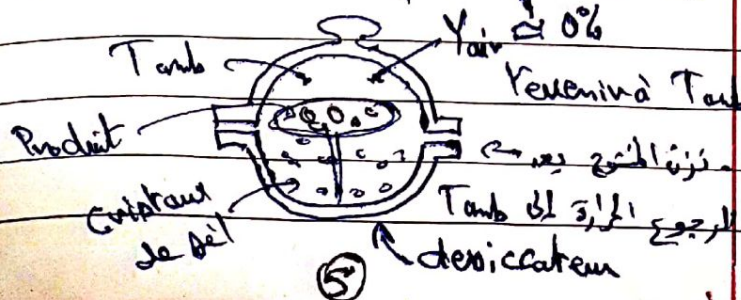
Mesure  $M_2$  (a) (b) (c)

$X_0 = \frac{M_1 - M_2}{M_2}$        $M_2 =$  masse sèche

$X_{h_0} = \frac{M_1 - M_2}{M_1}$

$X_0$  (a) }  $X_0$  (b) }  $X_0$  (c) }  $\approx 2\%$   
 يجب أن يكون  $X_0$  بين 1% و 2%  
 في العينات الجافة  $\approx 2\%$

- ① → Sortir étuve
- ② → séjour dans un desiccateur
- ③ → Mesure de poids final " $M_2$ "

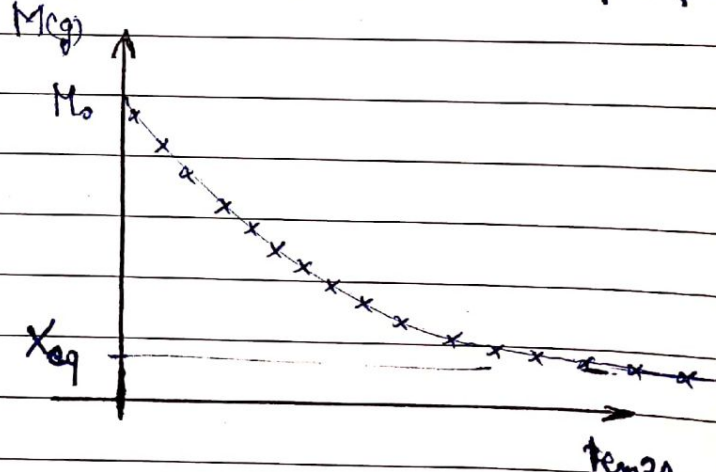


2 - Mise en service du séchoir jusqu'à atteindre  $T_a$  homogène ( $\approx 30$  min à vide)

3 - Préparation du produit.  
 4 - Début du séchage  $\equiv$  introduire le produit en couche mince et mesure la masse  $M(t)$  à  $\Delta$  temps réguliers.

5 - Arrêt de l'exp lorsque  $M(t) \equiv$  cste

Expérience  $\Rightarrow$  Courbe  $M = f(t_{exp})$



Connaissant  $X_0$ , donc masse sèche on convertit  $M(t)$  à  $X(t)$   $\Rightarrow$  Cinétique de séchage



2020 ordo 12

2.2.2.2. Courbes de séchage

$X_0$  = teneur en eau initiale

$X_{cr}$  = teneur en eau critique

$X_{eq}$  = teneur en eau d'équilibre

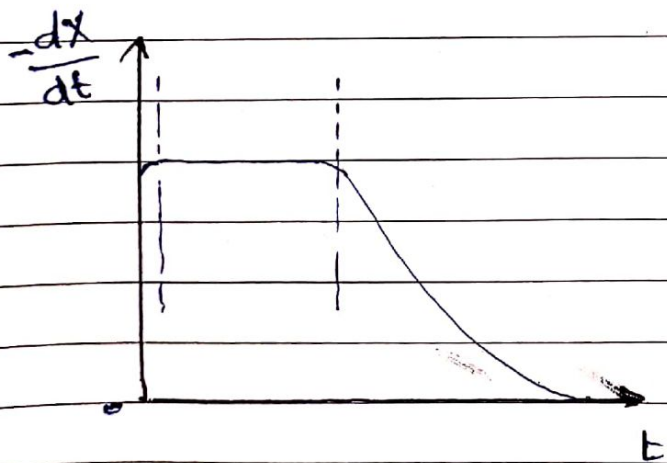
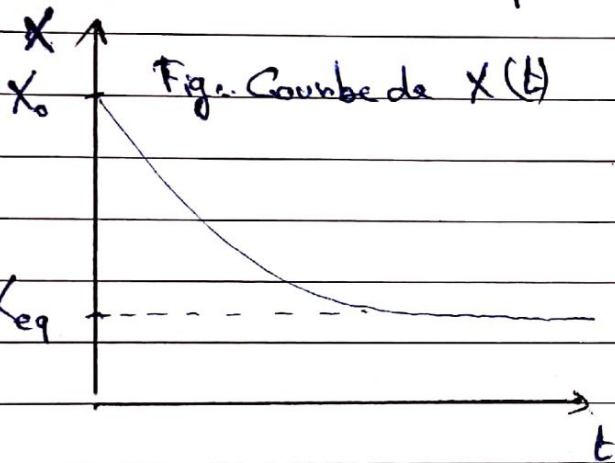


Fig. Courbe  $-\frac{dx}{dt} = f(t)$

(7)

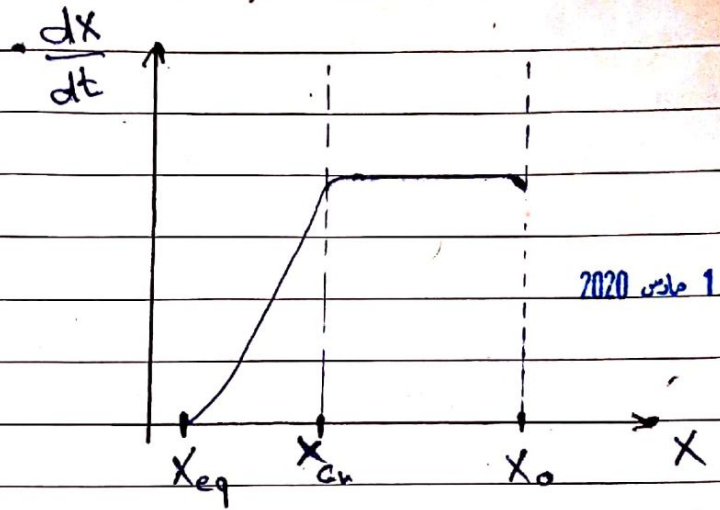


Fig. Courbe de  $-\frac{dx}{dt} = f(X)$

(8)