

Séchage thermique

Chapitre 1 :

Rappels sur l'air humide

Introduction

Le séchage est l'une des plus principales opérations de conservation de nombreux produits alimentaires. Il constitue souvent la dernière opération (après généralement l'opération d'évaporation) du procédé de fabrication d'un produit. C'est une opération de séparation thermique qui consiste à retirer tout ou une partie d'un liquide imprégnant un corps dit « humide » par vaporisation de ce solvant. Le produit final est un solide qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle.

Le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie alimentaire est le séchage par entraînement : la température reste inférieure à celle d'ébullition de l'eau et le gaz d'entraînement est généralement de l'air. C'est l'air qui cède sa chaleur au produit et reçoit l'humidité extraite de celui-ci. **Le séchage est alors défini comme étant un double transfert de chaleur et de masse.**

La compréhension des phénomènes mis en jeu lors du séchage des produits alimentaires se base principalement sur : (i) les équilibres air-produit ; et (ii) les cinétiques de séchage et de transformation du produit.

Ce chapitre fait suite au chapitre précédent relatif à l'évaporation et s'attache à présenter dans un premier temps les principes physiques du séchage ; en se basant sur ceux-ci, la construction et les propriétés du diagramme enthalpie de l'air humide seront étudiées. Par la suite, nous aborderons succinctement quelques notions de bilan sur les séchoirs. Nous terminerons en présentant les principaux types de séchoir appliqués dans l'industrie agroalimentaire ainsi que la qualité des produits séchés.

1- Généralité sur l'air atmosphérique

L'atmosphère est un mélange de gaz et de particules qui entourent notre planète. Il a les rôles suivants :

- Permettre la vie du monde animal par l'oxygène qu'elle contient,
- Garantir une température compatible avec la vie.
- Stopper les rayonnements solaires nocifs

Composition actuelle de l'atmosphère près de la surface de la Terre

Tableau -1- : Compositions normale de l'air atmosphérique pur est sec près du niveau de la mer

Nom du gaz	Symbole	Pourcentage (%)	Masse molaire (g.mol ⁻¹)
Azote	N ₂	78	28.0134
Oxygène	O ₂	21	31.9988
Argon	A	0.93	39.948
Vapeur d'eau	H ₂ O	0 – 4	44.00995
Gaz carbonique	CO ₂	0.033	20.183
Néon	Ne	0.0018	-
Hélium	He	5.24 10 ⁻⁴	4.0026
Krypton	Kr	0.00014	83.80
Hydrogène	H ₂	0.00005	2.01594

Oxyde d'azote	N ₂ O	0.00005	-
Xénon	Xe	0.0000087	131.30
Ozone	O ₃	0 – 0.000001	47.9982
Radon		6.-15 ⁻¹⁰	222

Résumé de la composition de l'air		
Air Humide	Air sec pur	Composant de l'air sec pur (N ₂ , O ₂ , Ar, CO ₂ , H ₂ , Kr et Xe)
	Humidité	Vapeur d'eau H ₂ O
	Polluants	Gaz divers
		Polluants naturels
Polluants artificiels		
Germes		

2- L'air humide

2.1. Diagramme de l'air

Le diagramme enthalpique de l'air humide est un instrument pratique et efficace pour :

- Etudier et évaluer l'énergie nécessaire à la maîtrise des conditions du séchage.
- La mise en œuvre correcte du processus industriel.
- Déterminer toutes les propriétés de l'air telles que :
 - La température sèche T_s [°C]
 - La température de rosée T_r [°C] .
 - La Température du thermomètre humide T_h [°C]
 - L'enthalpie H [Kj/kg]
 - L'humidité relative HR ou φ [%]
 - L'humidité absolue H_a [kg(eau)/Kg(air sec)] \equiv [kg_{eau}/kg_{as}] ...etc.
- Suivre l'évolution de ces paramètres au cours de l'opération du séchage sans avoir recours à des calculs fastidieux.
- Il nous aide pour le calcul et le dimensionnement des différents éléments de l'installation.

2.2. Paramètres de l'air

2.2.1. Températures

- **Température sèche T_s**

C'est la température mesurée par un thermomètre dit « sec », elle s'exprime en degré Celsius (°C). La température sèche peut être assimilée à un niveau d'énergie.

▪ **Température humide T_h**

Elle est mesurée à l'aide d'un thermomètre légèrement ventilé et entouré d'un chiffon imbibé d'eau. Pratiquement, en entourant l'élément sensible d'un thermomètre classique d'une ouate imprégnée d'eau et en soumettant ce thermomètre à un courant d'air, on obtient la température humide de l'air.

C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un chiffon imbibé d'eau, ventilé par un courant d'air et protégée du rayonnement. L'unité de mesure est le °C.

A la surface du thermomètre à bulbe humide, l'eau se vaporise.

La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air. L'ensemble thermomètre sec plus thermomètre humide est appelé **psychromètre**.

$$T_s \geq T_h$$

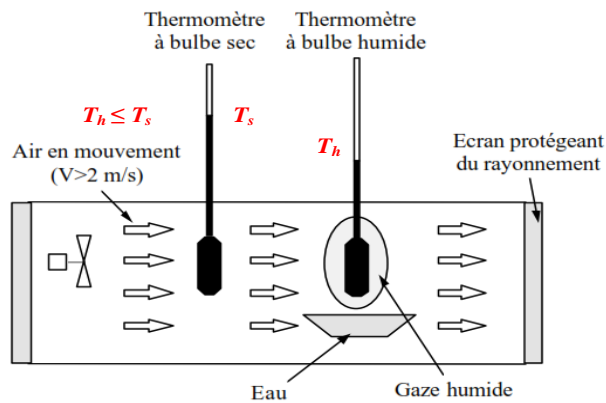


Fig-2.1- : Principe de mesure de la température humide

▪ **Température de rosé T_r**

C'est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser quand l'air se refroidit.

$$T_s \geq T_h \geq T_r$$

Pour l'air saturé on a

$$T_s = T_h = T_r$$

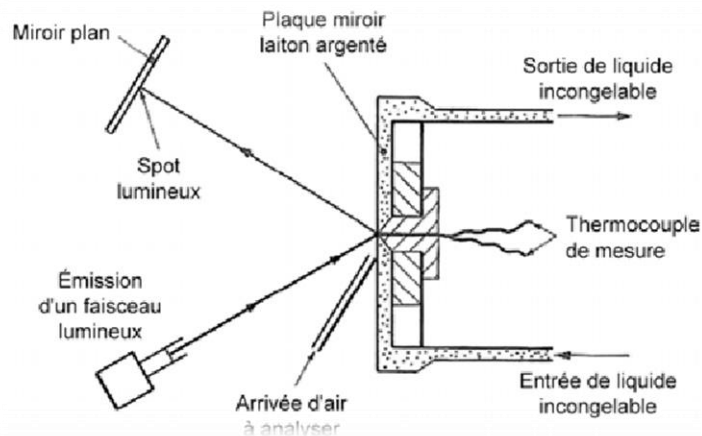


Fig-2.2- : Schéma de principe d'un thermomètre à point de rosée.

Un faisceau lumineux est réfléchi sur un miroir plan par une plaque en laiton argenté. La plaque de laiton est progressivement refroidie. A l'instant où se produit un début de condensation sur la plaque de laiton, le faisceau n'est plus réfléchi, la température mesurée par le thermocouple donne alors la température de rosée de l'air analysé.

2.2.2. L'humidité :

D'une façon générale. L'**humidité** est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air ou dans une substance (linge, pain, produit chimique, etc.). Elle peut se mesurer grâce à un hygromètre à cheveu ou numérique et s'exprime en pourcentage le plus souvent.

$$P_{sat}(T)V = m_{eau}^s r_{eau} T \quad \text{Alors} \quad \begin{cases} m_{eau} = \frac{P_{eau} \cdot V}{r_{eau} T} \\ m_{eau}^s = \frac{P_{sat}(T) \cdot V}{r_{eau} T} \end{cases}$$

D'où :

$$\varphi = \frac{P_{eau}}{P_{sat}(T)} \quad \text{En pourcentage} \quad \varphi[\%] = \frac{P_{eau}}{P_{sat}(T)} \cdot 100$$

Remarque : $\varphi = 100\%$ air saturé et $\varphi = 0\%$ Air totalement sec.

- **Humidité spécifique encore appelée humidité absolue w**

C'est la masse de vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec. Il s'agit du rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec :

$$w = \frac{m_{eau}}{m_{as}}$$

Remarque :

m_{eau} Et m_{as} sont en $[kg]$. L'unité de w est donc le $[Kg_{eau}/Kg_{Air\ sec}]$ encore noté $[Kg_{eau}]/[Kg_{AS}]$ Mais les quantités de vapeur contenues dans l'air humide sont faibles (en climatisation), d'où l'unité souvent utilisée : $[g/Kg_{AS}]$

On a $P_{as} \cdot V = \frac{m_{as}}{M_{as}} RT$ et $P_{eau} \cdot V = \frac{m_{eau}}{M_{eau}} RT$

$$\frac{P_{eau}}{P_{as}} = \frac{m_{eau}}{m_{as}} \frac{M_{as}}{M_{eau}}$$

On sait que : $\begin{cases} M_{as} \approx 29.9644 \text{ g/mol} \\ M_{eau} = 18.0153 \text{ g/mol} \end{cases} \Rightarrow \frac{M_{as}}{M_{eau}} = \frac{1}{0.62198}$

$$\frac{P_{eau}}{P_{as}} = \frac{w}{0.62198}$$

$$w = 0.622 \frac{P_{eau}}{P_{as}}$$

$$w = 0.622 \frac{P_{eau}}{P - P_{eau}}$$

$$w = 0.622 \frac{P - P_{as}}{P_{as}}$$

Enthalpie H

L'enthalpie caractérise l'énergie thermique par kilogramme d'air. L'unité de mesure est le **kJ/kg** d'air.

Dans les diagrammes psychrométriques, l'air à 0 °C et sec a pour enthalpie 0, il s'agit donc d'une échelle relative.

- **Volume spécifique v**

C'est le volume occupé par un kilogramme d'air. Il s'exprime en **m^3/kg** d'air

- **Masse volumique ρ**

C'est la masse d'un mètre cube d'air. La masse volumique est l'inverse du volume spécifique. Elle s'exprime en **kg/m^3** d'air

2.1.1. Diagramme de l'air humide ou diagramme psychrométrique

Le diagramme de l'air est utilisé pour faciliter la représentation des transformations de l'air (chauffage, refroidissement, humidification et déshumidification) et le calcul des différents éléments de l'installation de climatisation. On générale Il existe deux types de diagramme de l'air humide :

a) Diagramme de **Mollier** : utilisé dans le domaine de la climatisation.

b) Diagramme de **Mollier-Ramzine** : utilisé dans le domaine de séchage

1.1. Construction du diagramme enthalpie de l'air humide

En séchage, la représentation la plus utilisée est le diagramme de **Mollier-Ramzine**, sur lequel

- L'enthalpie H (exprimée en kJ/kg d'air sec) est portée en ordonnées
- Le taux d'humidité absolue H_a (exprimé en kg d'eau/kg d'air sec) en abscisses.
- Les températures apparaissent sous la forme d'isothermes. Les axes sont obliques et l'inclinaison de l'axe des abscisses est choisie de manière à ce que l'isotherme à 0°C soit perpendiculaire à l'axe des ordonnées.
- L'humidité relative φ ou HR apparaît sur des courbes iso-humidité relative.

Les caractéristiques thermodynamiques de l'air humide à pression atmosphérique sont établies en considérant 1 kg d'air sec contenant H_a kg d'eau.

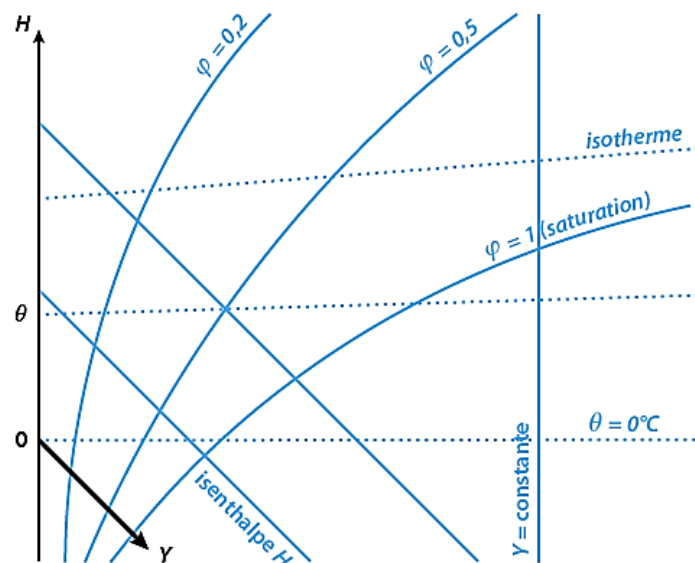


Figure 1 : Représentation schématique du diagramme de Mollier-Ramzine

1.2. Propriété de l'air dans le diagramme de Molier-ramzine

a) Température du thermomètre humide T_h

T_h Est définie comme la température à l'équilibre de l'air humide amené à saturation (formation des premières gouttes d'eau liquide) par augmentation de H_a (**Figure 2**). En pratique, c'est la température donnée par le thermomètre humide dont le bulbe est enveloppé dans un matériau poreux imprégné d'eau ; l'air humide est amené à une vitesse suffisante autour de celui-ci pour atteindre un équilibre définissant la T_h .

La T_h se lit à l'intersection de la droite isenthalpe passant par (T, H_a) de l'air avec la courbe HR = 100%

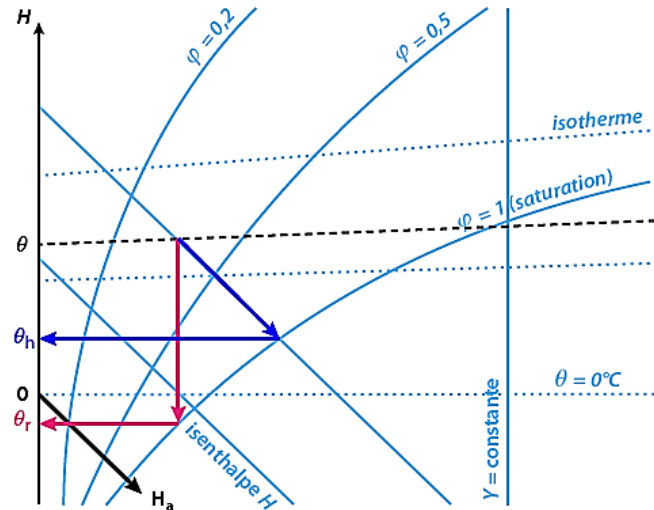


Figure 2 : Déterminations de la température de rosée et humide T_r, T_h

b) Température de rosée T_r ou θ_r

La température de rosée T_r d'un air humide est définie comme étant la température pour laquelle la pression de vapeur p est égale à la pression de vapeur saturante (Figure 2). On la mesure comme étant la température à laquelle, il faut refroidir l'air humide (à H_a constante) pour atteindre la saturation.

c) Humidité relative (HR ou φ)

HR ou φ est une mesure relative du degré de saturation en vapeur d'eau de l'air. Les capteurs les plus utilisés pour la détermination de l'HR sont les hygromètres à variation d'impédance. L'élément sensible est une couche mince d'un produit hygroscopique dont la résistivité ou la constante diélectrique varie beaucoup avec HR de l'air dans lequel il est placé.

d) Enthalpie

L'enthalpie de l'air humide est la somme de l'enthalpie de l'air sec et de la vapeur d'eau.

$$\checkmark H = H_{air\ sec} + H_{vapeur}$$

$$\checkmark H = C_{pa}T + H_a(\Delta H_{v0} + C_{pv}T) \quad (3)$$

Avec :

$$H_{air\ sec} = C_{pa}T$$

$$H_{vapeur} = H_a(\Delta H_{v0} + C_{pv}T) = H_a\Delta H_{v0} + H_aC_{pv}T$$

Où :

$C_{pa}T$: Enthalpie nécessaire pour faire passer l'air sec de 0°C à T (chaleur sensible)

$H_aC_{pv}T$: Enthalpie nécessaire pour faire passer la vapeur d'eau de 0°C à T (chaleur sensible)

$H_a\Delta H_{v0}$: Enthalpie de vaporisation de l'eau (chaleur latente) à 0°C

$$\{C_{pa} = 1.01\text{ kJ/kg}, C_{pv} = 1.92\text{ kJ/kg}, \Delta H_{v0} = 2494\text{ kJ/kg}\}$$

Dans la gamme des températures et des pressions atmosphériques ordinaires, l'équation (3) s'écrit :

$$H \approx 1.01T + H_a(2494 + 1.92T)$$

$$H \approx 2494H_a + (1.01 + 1.92H_a)T \quad (4)$$

- Représente la chaleur latente : $H' = 2494H_a$;

- Représente la chaleur sensible : $H'' = (1.01 + 1.92H_a)T$

$$H \approx H' + H''$$

e) Mélanges d'air

À l'aide du diagramme enthalpique de l'air humide, il est possible de déterminer les caractéristiques d'un mélange de deux airs (air 1 et air 2) de caractéristiques connues (**Tableau 2**). Tel que

$$\text{Air mélange} = \{\text{Air 1} + \text{Air 2}\}$$

L'humidité absolue H_{am} et l'enthalpie h_m du mélange M sont telles que :

$$\begin{cases} m_1 H_{a1} + m_2 H_{a2} = (m_1 + m_2) H_{am} \\ m_1 h_1 + m_2 h_2 = (m_1 + m_2) h_m \end{cases} \quad (6)$$

Alors pour le mélange on a :

$$\Rightarrow H_{am} = \frac{m_1 H_{a1} + m_2 H_{a2}}{m_1 + m_2}$$

$$\Rightarrow h_m = \frac{m_1 h_1 + m_2 h_2}{m_1 + m_2}$$

il en découle aussi :

$$\begin{cases} m_1 (H_{am} - H_{a1}) = m_2 (H_{a2} - H_{am}) \\ m_1 (h_m - h_1) = m_2 (h_2 - h_m) \end{cases} \quad (7)$$

Soit

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{H_{a2} - H_{am}}{H_{am} - H_{a1}} = \frac{h_2 - h_m}{h_m - h_1} \quad (8)$$

Remarque :

L'égalité des rapports de l'équation (8) se traduit par l'alignement des points 1, 2 et m sur le diagramme enthalpie de l'air humide.

Tableau 2 : Caractéristiques des airs 1 et 2 et de leur mélange			
	Masse (Kg d'air sec)	Enthalpie (KJ / Kg)	Humidité absolue (Kg d'eau / Kg d'air sec)
Air 1	m_1	h_1	H_{a1}
Air 2	m_2	h_2	H_{a2}
Mélange M	$m_1 + m_2$	h_m	H_{am}

Exemple

Soit le mélange d'air de masse m constitué de deux air dont les caractéristiques suivante

$$\text{Air 1} \begin{cases} h_1 = 100 \text{ KJ/Kg} \\ H_{a1} = 0.027 \text{ Kg(eau)/Kg(as)} \\ m_1 = 1.5 \text{ kg} \end{cases} \quad \text{et} \quad \text{Air 2} \begin{cases} h_2 = 160 \text{ KJ/Kg} \\ H_{a2} = 0.04 \text{ Kg(eau)/Kg(as)} \\ m_2 = 2.5 \text{ kg} \end{cases}$$

Trouvez les caractéristiques de l'air avant et après le mélange

Solution

L'humidité absolue du mélange:

$$H_{am} = \frac{m_1 H_{a1} + m_2 H_{a2}}{m_1 + m_2} = \frac{1.5 \times 0.027 + 2.5 \times 0.04}{1.5 + 2.5} = 0.035 \text{ Kg(eau)/Kg(as)}$$

L'enthalpie du mélange:

$$h_m = \frac{m_1 h_1 + m_2 h_2}{m_1 + m_2} = \frac{1.5 \times 100 + 2.5 \times 160}{1.5 + 2.5} = 137.5 \text{ KJ/Kg}$$

A partir du diagramme de l'air on tir les autres paramètres de l'air 1, 2 et le mélange

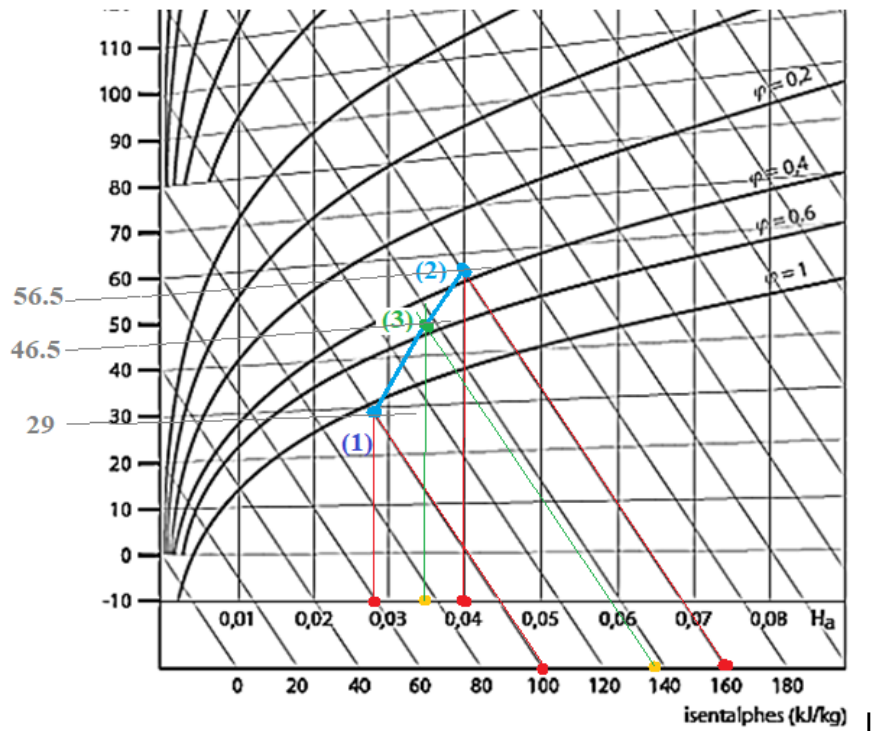


Figure 6 : Représentation de l'air 1, 2 et le mélange (1+2) sur le diagramme

Tableau 2 : Caractéristiques des airs 1 et 2 et de leur mélange

Paramètres	Symbole	Unité	Air 1	Air 2	Mélange M
Masse	m	Kg	1.5	2.5	4
Enthalpie	h	Kj/Kg	100	160	137.5
Humidité absolue	H_a	$Kg(eau)/Kg(as)$	0.027	0.04	0.035
Température sec	T_s	$^{\circ}C$	29	56.5	46.5
Humidité relative	φ	-	1	0.38	0.58

Utilisation du diagramme de l'air humide en séchage

Le séchage peut être effectué à des pressions autres que la pression atmosphérique. La construction du diagramme enthalpique est sensiblement le même, à l'exception du tracé des courbes d'humidité relative qui dépend de la pression totale.

Pour pouvoir utiliser le diagramme de Mollier-Ramzine, on utilise les courbes (i/P_r) au lieu de HR où

$$i = \frac{\text{Pression saturante de vapeur d'eau à T de l'air}}{\text{Pression totale de vapeur d'eau dans l'atmosphère}} = \frac{P_s}{P_t}$$

Où P_r est égale au rapport de la pression totale à laquelle on travaille à la pression atmosphérique ordinaire : $P_r = \frac{P_t}{P_{atm}}$

Ceci explique qu'un air saturé à pression atmosphérique :

- (i) comprimé de façon isotherme, devient un brouillard puisqu'il passe sous sa courbe de saturation
- (ii) et détendu de la même façon se dé-sature puisqu'il passe au-dessus de sa courbe de saturation.

