

Master 1 Génie des Procédés des Matériaux

Cours Operations unitaires II

Rappels de thermodynamique

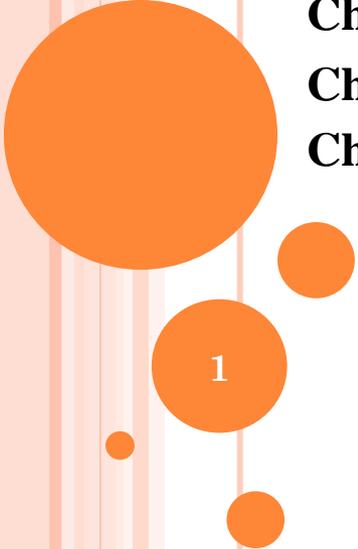
Chapitre 1 : Procédés d'agglomération et de fragmentation des solides

Chapitre 2 : Opérations d'humidification

Chapitre 3 : Séchage et Evaporation

Chapitre 4 : Tours de contact gaz-liquide

Chapitre 5 : Séparation Solide-Liquide



1

Année universitaire 2023/2024

Réalisé par S. TOUZOUIRT

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

1. Généralités

1.1. Définition de l'humidification

1.2. Caractéristiques de l'air

2. Humidité

2.1. Humidité absolue

2.2. Humidité relative

3. Températures

3.1. Température sèche

3.2. Température humide (Température à bulbe humide)

3.3. Température de rosé

4. Diagramme de l'air humide

5. Opérations unitaires sur l'air humide

5.1. Enthalpie de l'air humide

5.2. Humidification

5.3. Déshumidification

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

1. Généralités

1.1. Définition de l'humidification

L'humidification est l'opération par laquelle l'humidité absolue de l'air est augmentée.

1.2. Caractéristiques de l'air

a) **Air sec /dry air:** est un mélange de gaz, principalement, l'azote, l'oxygène, gaz carbonique....avec une masse molaire de 28.964g/mol. Air sec est considéré comme gaz parfait. Ces caractéristiques dépendent de l'altitude, de la situation géographique et des conditions atmosphériques.

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

1. Généralités

1.2. Caractéristiques de l'air

b) Air humide : c'est un mélange d'air sec et de la vapeur d'eau à l'état gaz. Donc l'air humide est composé de deux gaz parfait, l'air sec (en majorité) et la vapeur d'eau.

$$P_{atm} = P_{ah} = P_{as} + P_{ve}$$

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

2. Humidité

2.1. Humidité absolue / absolute humidity

L'humidité absolue décrit la quantité totale d'eau contenue dans un certain volume d'air ou masse d'air sec. L'humidité absolue est généralement donnée en grammes par mètre cube (g/m^3), ou g/kg .

$$H_a = \frac{m_v}{m_{as}}$$

- L'air à 30°C peut contenir 31 grammes d'eau par mètre cube ($31 \text{ g}/\text{m}^3$)
- L'air à 5°C ne peut contenir que 7 grammes d'eau par mètre cube ($7 \text{ g}/\text{m}^3$)

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

2. Humidité

2.2. Humidité relative / relative humidity

Ou degré hygrométrique, elle correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions.

$$H_R = \frac{p_v}{p_{vs}} \times 100$$

p_v : Pression partielle de la vapeur d'eau (partial pressure)

p_{vs} : Pression de vapeur saturante (vapor pressure)

$H_R = 100\%$: Air saturé ; $H_R = 0\%$: Air sec

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

3. Températures

3.1. Température sèche / dry temperature

La température sèche correspond à la température classique donnée par un thermomètre mais protégée de l'humidité et des radiations.

3.1. Température humide (Température à bulbe humide) wet temperature

C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'une gaze mouillée, balayée par de l'air en mouvement et protégée du rayonnement solaire.

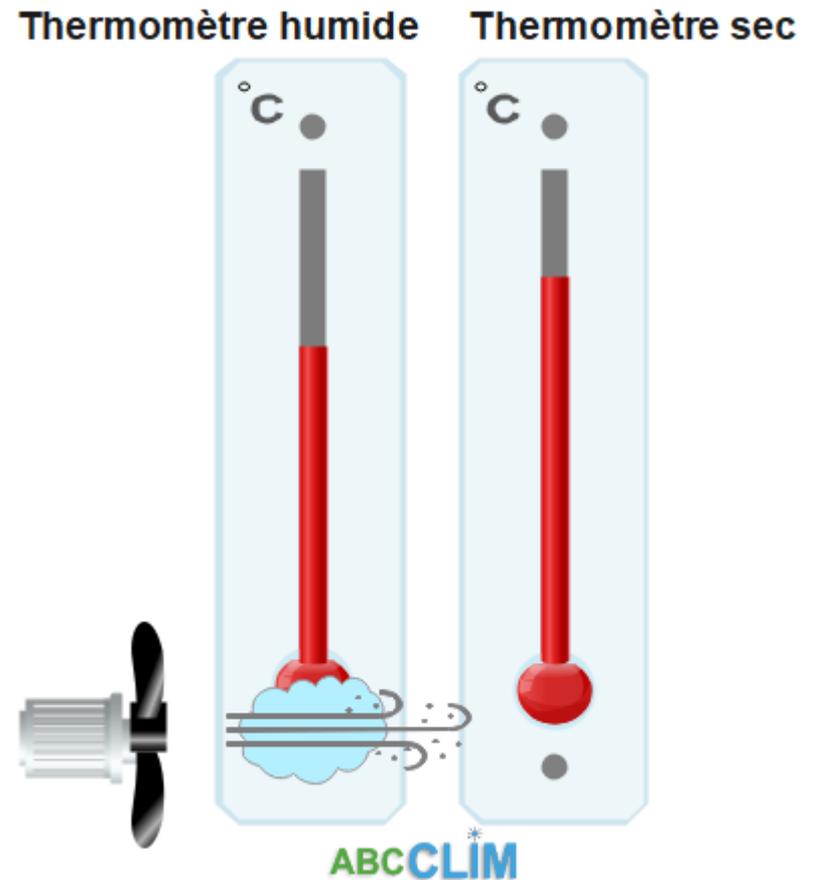
CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

3. Températures

3.1. Température humide (Température à bulbe humide)



Psychromètre
psychrometer

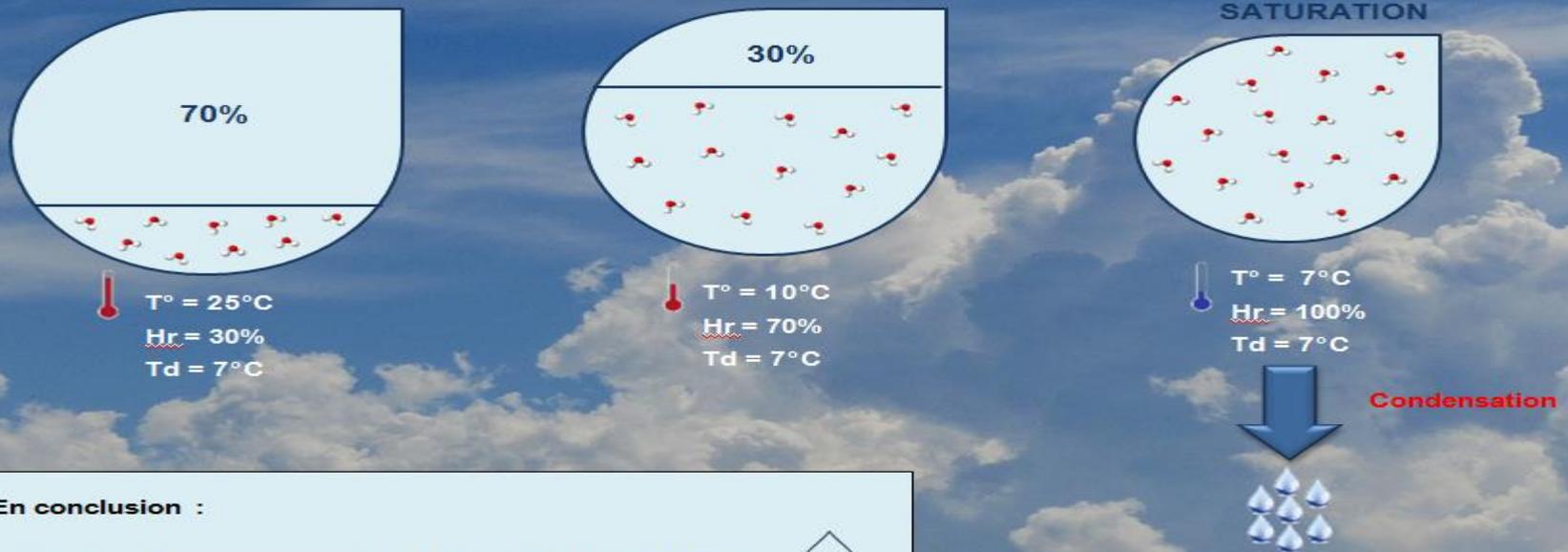


CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

3. Températures

3.2. Température de rosé / dew point temperature

Le point de rosée ou température de rosée est la température sous laquelle de la rosée se dépose naturellement.



En conclusion :

Température air \longleftrightarrow Température point de rosée

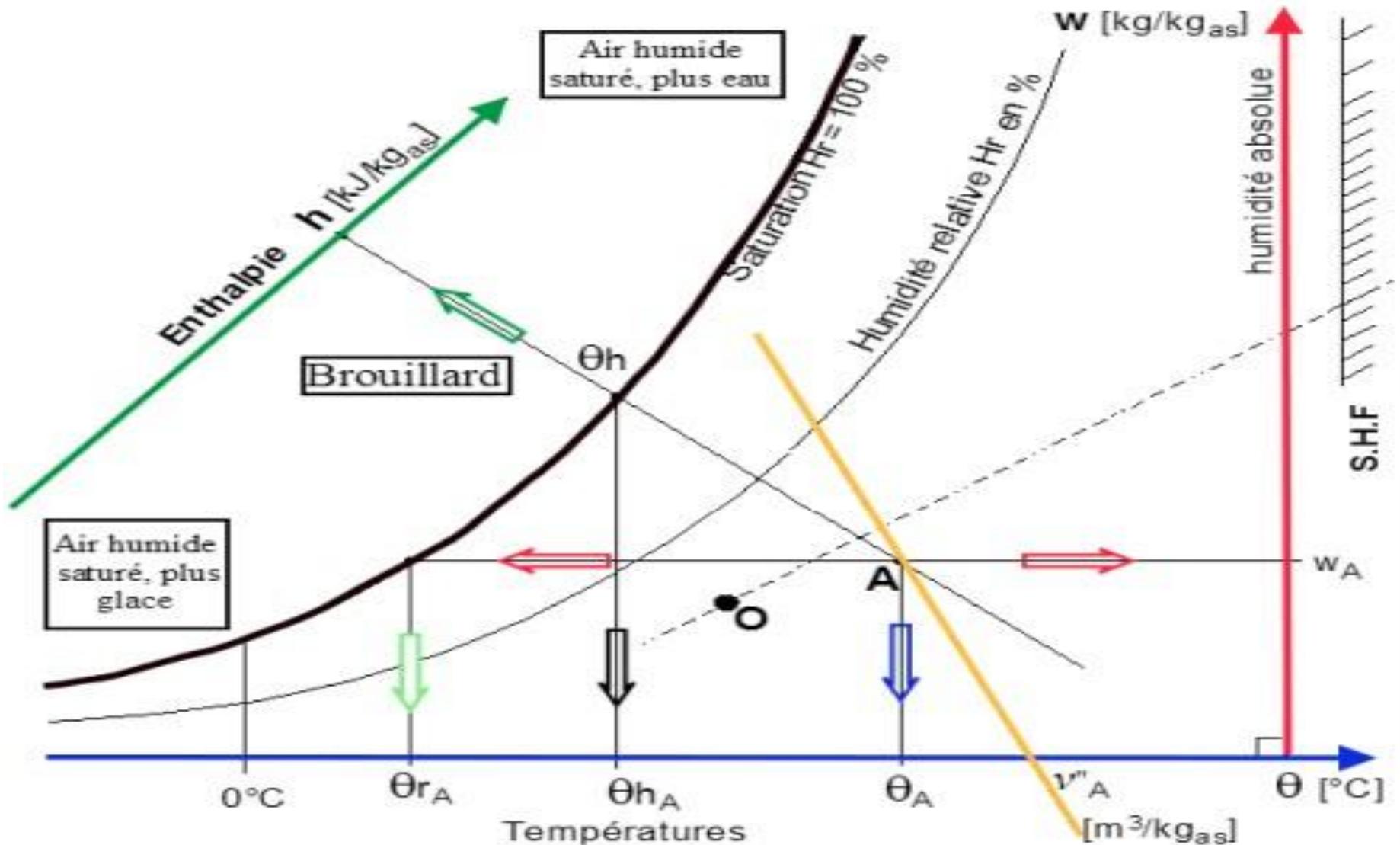


Température air \longleftrightarrow Température point de rosée



CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

4. Diagramme de l'air humide



CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

5. Opérations unitaires sur l'air humide

On s'intéresse dans ce cours à deux opérations importantes : humidification et déshumidification (chauffage et refroidissement)

5.1. Enthalpie de l'air humide

L'enthalpie de l'air humide exprime l'énergie contenue dans cet air. Elle est composée de l'enthalpie de l'air sec et celle de la vapeur d'eau. Elle est donnée en KJ.

$$H_{ah} = H_{as} + H_{ve}$$

Remarque : $H = m \cdot h$ (h : enthalpie spécifique)

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

5. Opérations unitaires sur l'air humide

5.1. Enthalpie de l'air humide

a) **Enthalpie de l'air sec** : c'est la quantité de chaleur à fournir à 1Kg d'air sec pour élever sa température de T_1 à T_2

$$H_{as} = m_{as} \times C_{as} \times (T_2 - T_1)$$

C : chaleur massique de corps (en $J/kg^\circ C$), ou capacité thermique massique ou encore chaleur spécifique.

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

5. Opérations unitaires sur l'air humide

5.1. Enthalpie de l'air humide

b) Enthalpie de vapeur d'eau : composée de la chaleur sensible et de la chaleur latente

$$H_{ve} = Q_{sen} + Q_L$$

$$Q_{sen} = m_{ve} \times C_{ve} \times (T_2 - T_1) ; \quad Q_L = m_{ve} \times L_{ve}$$

L_{ve} : chaleur massique latente de l'eau

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

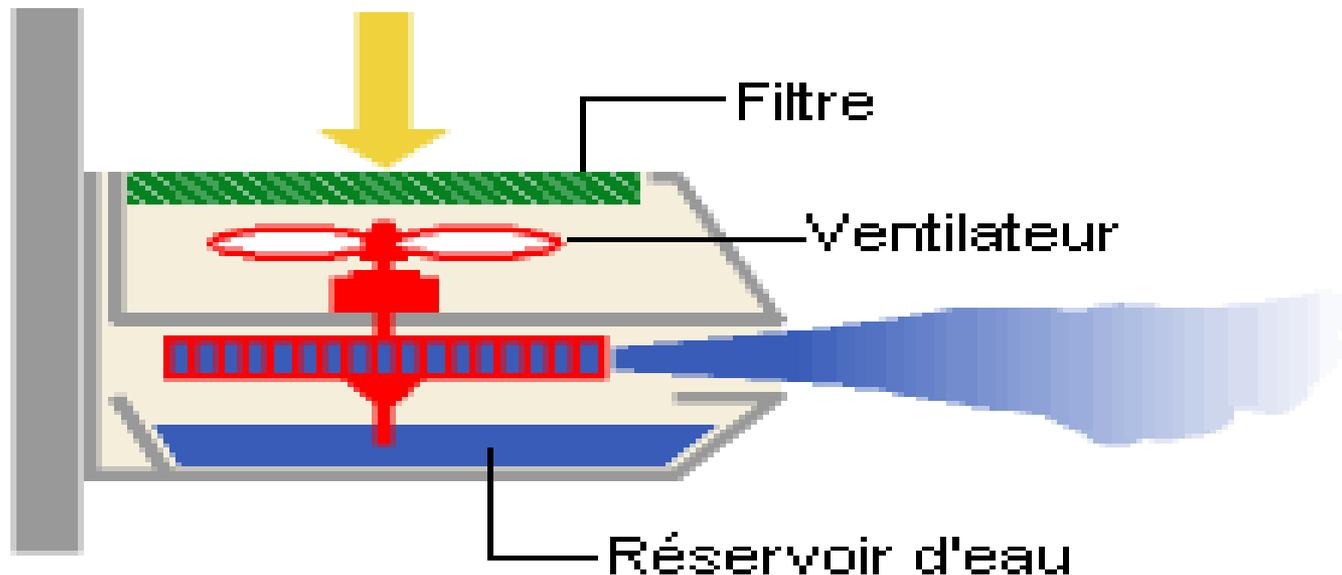
5. Opérations unitaires sur l'air humide

5.2. Humidification

L'humidification de l'air consiste à augmenter la quantité de vapeur d'eau dans l'air ambiant (**augmentation de H_a**).

a) Humidification par injection de vapeur d'eau

La vapeur d'eau est produite par un humidificateur autonome ou un système centralisé de production de vapeur. La vapeur produite est ensuite directement injectée dans le conduit ou dans la centrale de traitement d'air.



CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

5. Opérations unitaires sur l'air humide

5.2. Humidification

a) Humidification par injection de vapeur d'eau

➤ Calcul du débit d'humidification (Débit de vapeur à injecter)

Le débit de vapeur d'eau ou d'eau pulvérisée est donné par la formule suivante :

$$Q_{mv} = Q_{ainj}(H_{a2} - H_{a1})$$

Q_{mv} : débit massique de vapeur ou d'eau pulvérisée injecté pour assurer l'humidification, en [kg/s]

Q_{ma} : débit massique d'air soufflé en [kg/s]

H_{a1} : humidité absolue à l'entrée de l'humidificateur [kg eau/kg air sec]

H_{a2} : humidité absolue à la sortie de l'humidificateur [kg eau/kg air sec]

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

5. Opérations unitaires sur l'air humide

5.2. Humidification

a) Humidification par injection de vapeur d'eau

➤ Détermination de la puissance de l'humidificateur

La puissance de l'humidificateur à l'air se calcule de la manière suivante :

$$P = Q_m(h_2 - h_1)$$

P : Puissance apportée par l'humidificateur en [kW]

h₂ : enthalpie de l'air à la sortie de l'humidificateur en [kJ/kg]

h₁ : enthalpie de l'air à l'entrée de l'humidificateur en [kJ/kg]

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

5. Opérations unitaires sur l'air humide

5.2. Humidification

b) Humidification adiabatique par atomisation

L'eau pulvérisée en fines gouttelettes dans l'air à humidifier. Une partie de ces gouttelettes va s'évaporer en empruntant de la chaleur à l'air, l'air va se refroidir et son humidité va augmenter.

. Calcul du débit d'humidification

Le débit est donné par la même formule :

$$Q_{me} = Q_{ainj}(H_{a2} - H_{a1})$$

. Détermination de la puissance de l'humidificateur adiabatique

La puissance d'un humidificateur adiabatique est nulle $P_h = 0$ (car $h_2 = h_1$).

CHAPITRE 2 : OPÉRATIONS D'HUMIDIFICATION

5. Opérations unitaires sur l'air humide

5.3. Déshumidification

La déshumidification de l'air consiste à réduire la quantité de vapeur d'eau dans l'air ambiant. Pour réaliser cette fonction, on distingue deux procédés:

La condensation (ou cycle réfrigérant) : Le principe consiste à faire passer de l'air humide sur une surface froide (batterie de réfrigération) dont la température est inférieure à celle du point de rosée (condensation). L'air ainsi refroidi perd une partie de sa vapeur d'eau.

➤ **L'absorption** : Toutes les substances hygroscopiques agissent de manière similaire, c'est à dire qu'elles absorbent l'humidité de l'air, grâce à la différence de pression existant entre la vapeur d'eau sur leur surface et celle de l'air environnant. On utilise seulement les substances qui présentent une action réversible (régénérable).