

# Humidification d'air avec un échangeur eau-air

Enseignant(s) référent(s) : Simon BINDER ([simon.binder@univ-lorraine.fr](mailto:simon.binder@univ-lorraine.fr)), Nour ABOU-SALEH ([nour.abou-saleh@univ-lorraine.fr](mailto:nour.abou-saleh@univ-lorraine.fr)).

## Consignes de sécurité propres à ce TP :

- Le contacteur eau-air doit être manié avec précaution. En particulier, il ne faut pas forcer sur la tuyauterie mobile en bas du contacteur, ni sur l'axe de rotation du contacteur.

## Pré-requis :

- Module de Transferts de matière et de chaleur, cours " transfert de matière et de chaleur ", Éric Olmos, ENSAIA, 1<sup>re</sup> année IA.
- Module de Introduction aux méthodes de génie des procédés, cours " Bilans de matière et de chaleur", Frantz Fournier, ENSAIA, 1<sup>re</sup> année IA.
- Module de Thermodynamique appliquée, cours " Bases I ", Jérémy Petit, ENSAIA, 1<sup>re</sup> année IA.

## 1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

L'industrie agro-alimentaire est un secteur particulièrement exigeant en termes de conditionnement d'air. L'ensemble des paramètres (température, hygrométrie, qualité microbienne de l'air) doit être parfaitement maîtrisé afin de garantir une qualité optimale des produits agroalimentaires et prévenir des risques sanitaires.

En fromagerie, par exemple, le contrôle de l'hygrométrie et de la ventilation dans les caves d'affinage permet de limiter la « perte de poids », tout en contrôlant le développement de la flore microbienne de surface, qui est, le plus souvent indispensable à l'élaboration de la qualité du produit fini. Dans l'industrie agricole, il est également important de réguler l'humidité de l'air dans les serres pour optimiser la croissance des plantes.

Dans ce TP, un contacteur eau-air à contre-courant sera étudié afin d'évaluer ses performances en terme du transfert de matière, ceci dans différentes conditions de débits des deux fluides en circulation.

A partir des relevés d'humidité de l'air et des températures en entrée et sortie du système d'une part, et de l'écriture de bilans de matière appropriés d'autre part, l'objectif est de calculer les deux grandeurs physiques suivantes :

- le flux de vapeur d'eau transférée  $j$  entre les deux phases ;
- le coefficient de transfert de matière  $k$ .

Ensuite, il s'agira d'identifier les conditions de débits optimales pour maximiser les performances de transfert de matière du système. Les valeurs des coefficients de transfert obtenus seront comparées aux valeurs typiques de la littérature et des humidificateurs industriels. Enfin, la prise en compte de la consommation énergétique de ces systèmes est attendue dans la discussion des résultats et dans les remarques concluantes.

## 2. CONCEPTS THEORIQUES : MODELISATION DU TRANSFERT DE MATIERE DANS UN CONTACTEUR EAU-AIR A CONTRE-COURANT

Un schéma d'un contacteur gaz-liquide est présenté sur la Figure 1a. L'air à l'entrée est alimenté en pied du contacteur à un débit massique d'air sec noté  $G$  ( $\text{kg}_{\text{air sec}} \cdot \text{s}^{-1}$ ). L'eau est alimentée, à contre-courant de l'air, en tête du contacteur avec un débit massique noté  $L$  ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Un flux d'eau vapeur, noté  $j$  ( $\text{kg}_{\text{eau}}$

vapeur. $s^{-1}$ ), est transféré de la phase liquide vers la phase gazeuse. L'humidité absolue  $W$  caractérise la teneur en eau vapeur dans l'air humide et est définie comme le rapport entre la masse d'eau vapeur rapportée à la masse d'air sec contenue dans l'air humide ( $kg_{\text{eau vapeur}} \cdot kg_{\text{air sec}}^{-1}$ ).

En écrivant le bilan de matière partiel sur l'eau vapeur dans la phase gazeuse, le flux transféré  $j$  peut s'exprimer en fonction de  $G$ ,  $W_1$  et  $W_2$ , comme suit (équation 1) :

$$j = G (W_2 - W_1) \quad (1)$$

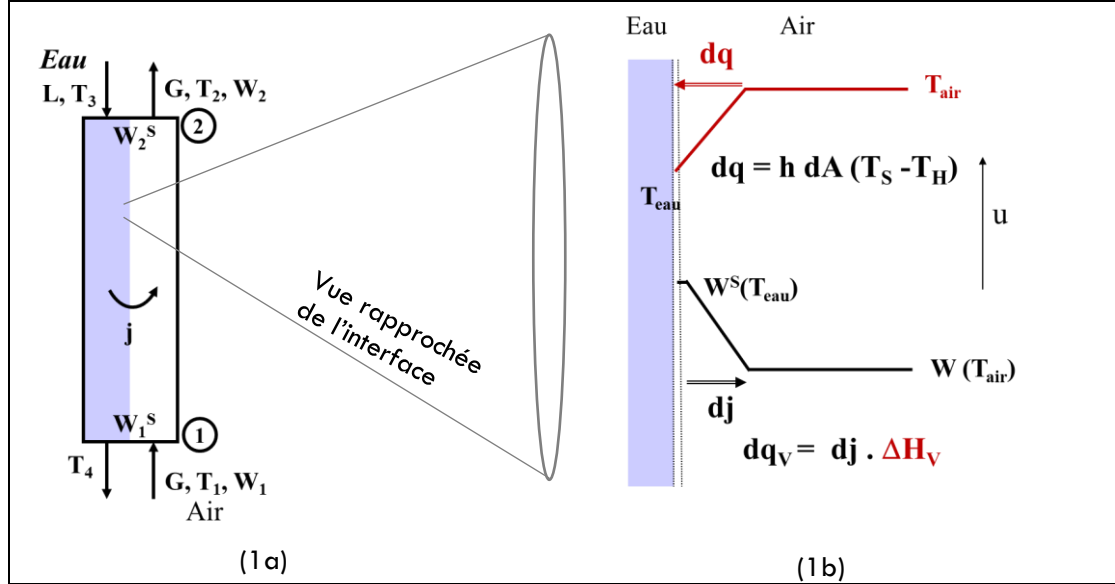


FIGURE 1 : TRANSFERT DE MATIERE DANS UN CONTACTEUR EAU-AIR (A) SCHEMA DU CONTACTEUR FONCTIONNANT A CONTRE-COURANT ; (B) VUE RAPPROCHEE DE L'INTERFACE EAU-AIR (MODELE DU FILM DE TRANSFERT).

Au sein du contacteur eau-air, le flux d'eau vapeur échangé localement ( $dj$ ) ( $kg_{\text{vapeur d'eau}} \cdot s^{-1}$ ) peut s'exprimer en fonction de la force motrice, ici un différentiel local d'humidité ( $W^s - W$ ) dans le film de transfert, de la surface d'échange locale ( $dA$ ) ( $m^2$ ) et du coefficient de transfert  $k$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) comme suit (équation 2) :

$$dj = k dA dW \quad (2)$$

Localement, l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est puisée dans la chaleur ( $dq$ ) apportée par l'air sec dont la température  $T_{\text{air}}$  est supérieure à  $T_{\text{eau}}$ . Le transfert de matière d'eau vapeur est ainsi associé à un flux de chaleur  $dq_v$  (égal à l'équilibre à  $dq$ ), pouvant s'exprimer comme suit (équation 3) :

$$dq_v = k dA dW \Delta \bar{H}_{vap} \quad (3)$$

Avec :

$W$  étant l'humidité locale au sein de l'air circulant dans la colonne au point de contact et  $W^s$  est l'humidité de l'air saturé en eau vapeur à l'interface eau-air, estimée à la température de l'eau, noté  $T_{\text{eau}}$  dans la Figure 1b.  $\Delta \bar{H}_{vap}$  est la chaleur massique de vaporisation de l'eau.

L'intégration de l'Equation 2 entre le bas (①) et le haut du contacteur (②) permet de calculer le flux de vapeur global échangé entre le bas et le haut du contacteur, selon la relation suivante (équation 4) :

$$j = k A (\Delta W)_{ml} \quad (4)$$

$(\Delta W)_{ml}$  est la moyenne logarithmique de la force motrice dans le contacteur et s'exprime comme suit (équation 5) :

$$(\Delta W)_{ml} = \frac{(\Delta W)_2 - (\Delta W)_1}{\ln \frac{(\Delta W)_2}{(\Delta W)_1}} \quad (5)$$

Avec :  $(\Delta W)_1 = (W^S - W)_1 = W_1^S - W_1$ .  $W_1^S$  est donc l'humidité à saturation de l'air à l'interface eau-air, estimée à la température de l'eau au point de contact ①, ici  $T_4$ .

et :  $(\Delta W)_2 = (W^S - W)_2 = W_2^S - W_2$ .  $W_2^S$  est donc l'humidité à saturation de l'air à l'interface eau-air, estimée à la température de l'eau au point de contact ②, ici  $T_3$ .

### 3. MATERIEL ET METHODES

#### A. MONTAGE EXPERIMENTAL

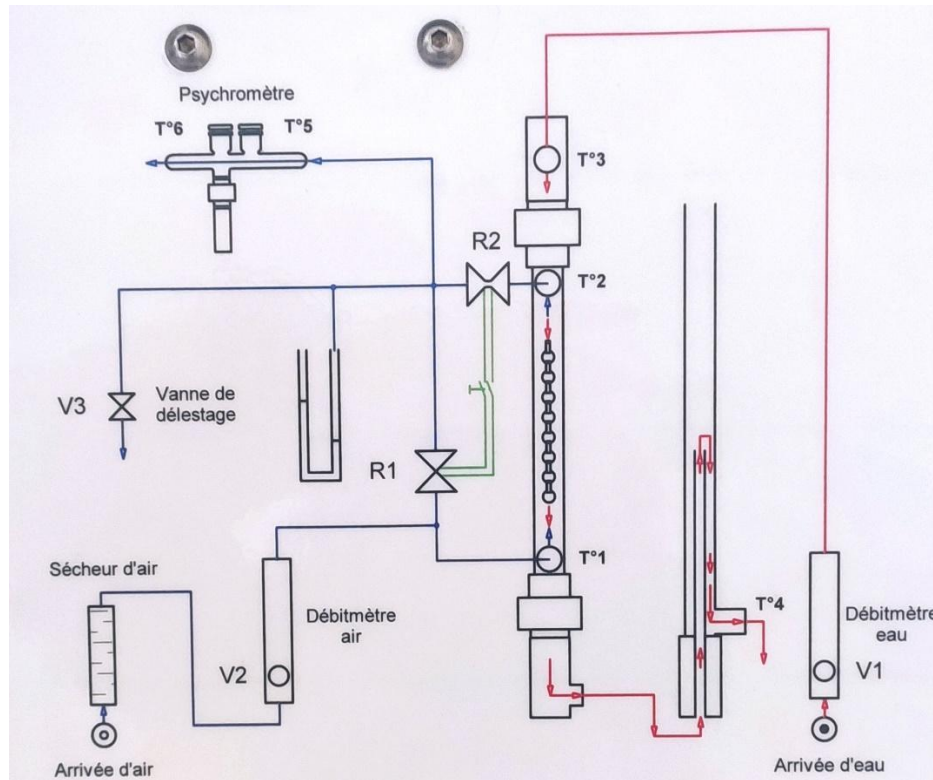


FIGURE 2 : SCHEMA DU CONTACTEUR EAU-AIR FONCTIONNANT A CONTRE-COURANT.

Le montage expérimental, présenté schématiquement dans la Figure 2, est composé des éléments suivants :

- Une colonne d'échange eau-air à film d'eau ruisselant sur 14 plateaux (diamètre 12 mm, épaisseur 4 mm) ;
- Un manomètre en U pour régler une surpression dans la colonne de 60 mmH<sub>2</sub>O par rapport à la pression atmosphérique ;
- Des vannes et rotamètres pour le réglage des débits ;
- Quatre sondes pour la mesure des températures d'entrée de l'air ( $T_1$ ) et de l'eau ( $T_3$ ) et de sortie de l'air ( $T_2$ ) et de l'eau ( $T_4$ ) ;
- Un psychromètre équipé de 2 sondes pour la mesure des températures de l'air : température sèche ( $T_5$ ) et température humide ( $T_6$ ) ;
- Un afficheur de température avec un sélecteur à 6 positions.

#### B. MESURE PSYCHROMETRIQUE

La mesure d'humidité repose sur le principe suivant : une mèche humide est placée dans le courant d'air de température  $T$ , dont on veut mesurer l'humidité absolue  $W$  et ceci à une vitesse "suffisante". L'air au voisinage de la mèche humide est alors saturé en eau vapeur, sa température est notée  $T_h$  (température humide) et son humidité est notée  $W^s$  (Figure 3).

Au contact de la mèche, un transfert de vapeur se produit (si l'air n'est pas saturé). L'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est puisée dans la mèche humide qui voit sa température baisser et se stabiliser à  $T_h$ , dite température humide. La différence de température entre l'air et l'eau implique également un flux de chaleur par convection. A l'état stationnaire, il existe une relation entre les températures stationnaires de la mèche ( $T_h$ ) et de l'air ( $T_s$ ) et l'humidité dans l'air ( $W$ ). Cette relation peut être établie à partir de bilans. Elle est également traduite sous forme graphique dans le diagramme de l'air humide présenté dans la Figure 4 (cf. Cours thermodynamique appliquée, diagramme de l'air humide).

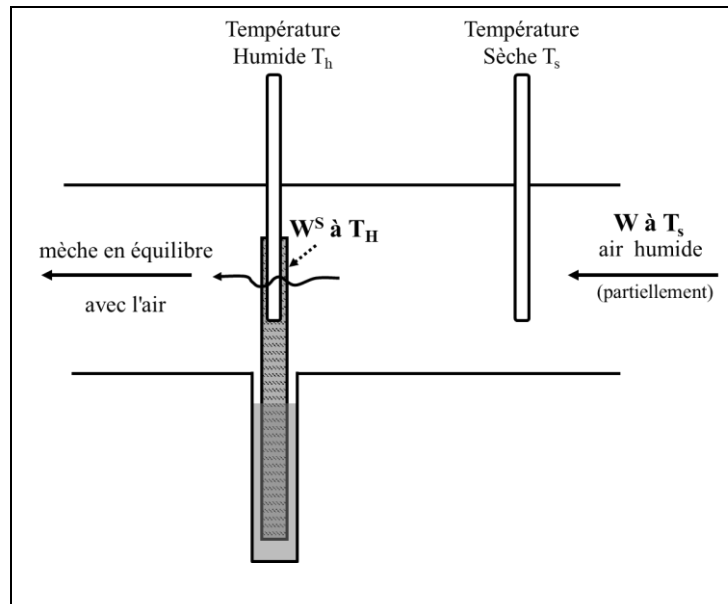


FIGURE 3 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA MESURE PSYCHOMETRIQUE.

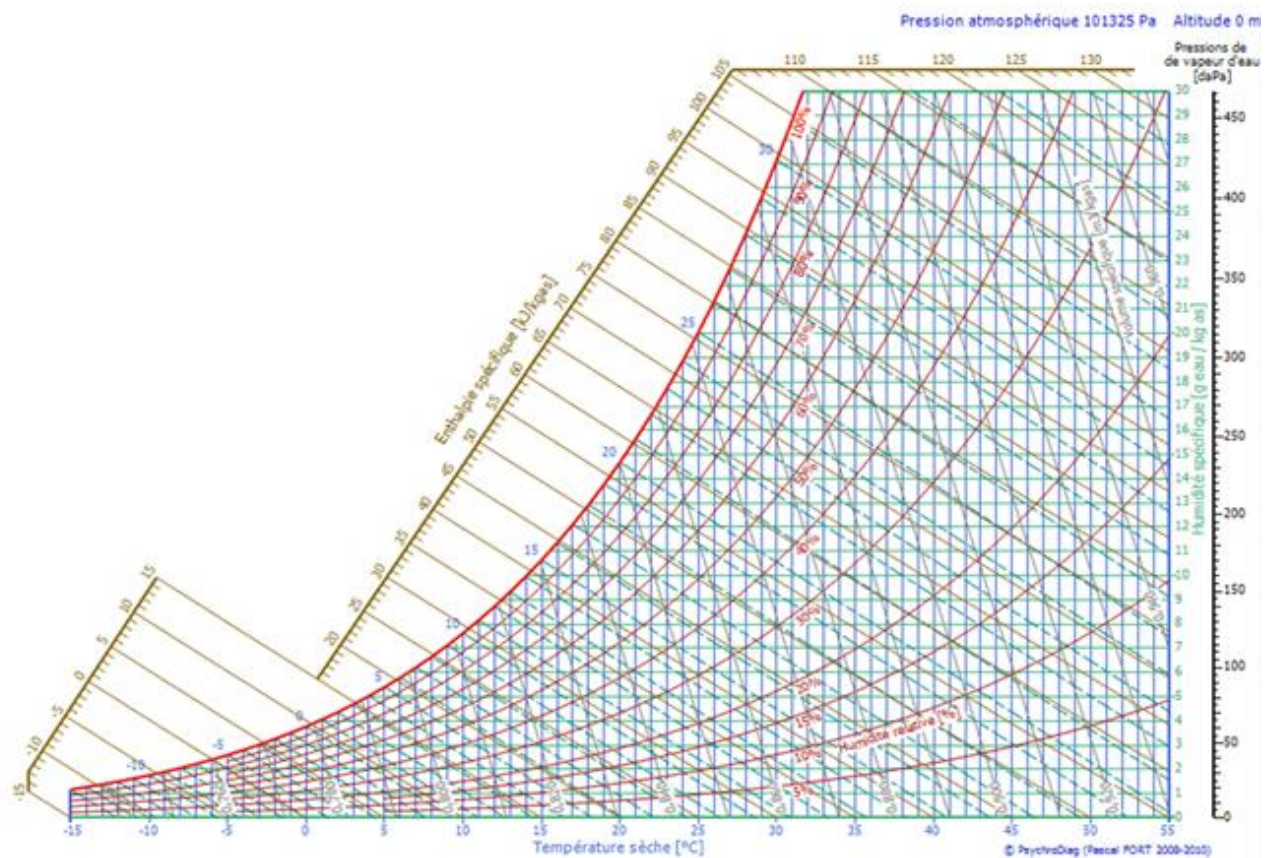


FIGURE 4 : DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE - DIAGRAMME DE VERON-CASARI.

## C. REALISATION DES EXPERIENCES

1. Allumer le pilote avec l'interrupteur noir situé derrière le pilote.
2. Ouvrir un petit peu la vanne d'air comprimé.
3. Fixer un débit de gaz de 1800 L.h<sup>-1</sup> (la vanne d'eau reste fermée). Après un temps suffisant de séchage de la colonne, on relève T5 et T6 afin de pouvoir déterminer l'humidité de l'air entrant ( $W_1$ ).
4. Ouvrir doucement la vanne d'eau, régler le débit d'eau L, faire tourner l'axe vertical du contacteur pour faire tourner les disques et ainsi obtenir un mouillage optimal, positionner la garde hydraulique pour maintenir un niveau suffisant d'eau en bas de colonne tout en évitant de dépasser le niveau du tube en bas de colonne.
5. Régler le débit d'air G, ajuster la position de la garde hydraulique (à modifier pour chaque changement de débit d'air), manipuler la vanne de délestage pour ajuster la pression dans la colonne à au moins 52 unités (ce qui correspond à 60 mmH<sub>2</sub>O).
6. Attendre la mise en état stationnaire.  
Pour cela, relever les 6 températures toutes les 2 min.
7. Relever lorsqu'elles sont stabilisées (10 -15 min) :
  - Les températures de l'air en entrée et en sortie, T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> respectivement
  - Les températures de l'eau en entrée et en sortie, T<sub>3</sub> et T<sub>4</sub> respectivement
  - Les températures sèche et humide sur le psychromètre, T<sub>5</sub> et T<sub>6</sub> respectivement
8. Faire varier le débit d'air entre 1000 et 1800 L.h<sup>-1</sup> (environ 7 valeurs) à débit d'eau fixé à 6 L.h<sup>-1</sup> (et éventuellement, 1 ou 2 débits d'air à un débit d'eau différent, 8 L.h<sup>-1</sup>).  
Pour cela, reprendre ces opérations à partir du point 5 pour changer le débit d'air. Pour changer le débit d'eau, reprendre les opérations à partir du point 4.
  - Le débit d'air (6 à 8 points stationnaires)
  - Le débit d'eau (1 à 2 points stationnaires)

## 4. EXPLOITATION DES RESULTATS

- 1- Relever la quantité d'eau consommée lors du TP et remplir l'Excel du projet Val-EAU (onglet Humidificateur air).
- 2- Estimer la surface d'échange globale entre l'eau et l'air dans le contacteur, A (m<sup>2</sup>), à partir des données géométriques des disques composant le contacteur.
- 3- Déterminer pour chacune des conditions opératoires :
  - Les humidités en entrée et en sortie de l'air,  $W_1$  et  $W_2$ , en utilisant le diagramme de l'air humide
  - Le flux de vapeur échangé dans le contacteur,  $j$  par bilan
  - Les humidités à saturation en bas et en haut de colonne,  $W^{s_1}$  et  $W^{s_2}$  respectivement, en utilisant le diagramme de l'air humide
  - La moyenne logarithmique du différentiel d'humidité dans le contacteur :  $(\Delta W)_{ml}$
  - Le coefficient de transfert de matière,  $k$
- 4- Interpréter les résultats obtenus :
  - Etudier l'influence des débits d'air et d'eau sur les performances du transfert de matière
  - Identifier les conditions de débits optimales pour maximiser les performances de transfert de matière du système. Commentez.
  - Comparer les valeurs calculées des coefficients de transfert aux valeurs typiques de la littérature et des humidificateurs industriels

Réaliser et envoyer par mail à l'enseignant encadrant sous sept jours le fichier de calcul du TP regroupant les résultats des différentes expériences.

## 5. NOMENCLATURE

### Variables

|                        |                                           |                                                        |
|------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $T$                    | Température                               | (K)                                                    |
| $G$                    | Débit massique d'air sec                  | (kg d'air sec . s <sup>-1</sup> )                      |
| $L$                    | Débit massique d'eau en entrée            | (kg d'eau . s <sup>-1</sup> )                          |
| $j$                    | Fux d'eau vapeur échangé                  | (kg d'eau vapeur.s <sup>-1</sup> )                     |
| $W$                    | Humidité absolue $W$                      | (kg d'eau vapeur.kg <sup>-1</sup> d'air sec)           |
| $W^s$                  | Humidité absolue à saturation             | (kg d'eau vapeur.kg <sup>-1</sup> d'air sec)           |
| $(\Delta W)_{ml}$      | Moyenne logarithmique de la force motrice | (kg d'eau vapeur.kg <sup>-1</sup> d'air sec)           |
| $A$                    | Surface d'échange eau-air                 | (m <sup>2</sup> )                                      |
| $k$                    | Coefficient de transfert de matière       | (m.s <sup>-1</sup> )                                   |
| $q$                    | Flux de chaleur échangé                   | (J.s <sup>-1</sup> )                                   |
| $h$                    | Coefficient de transfert de chaleur       | (J.s <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ) |
| $\Delta \bar{H}_{vap}$ | Chaleur massique de vaporisation          | (J.kg <sup>-1</sup> )                                  |