

ETUDE DU COMPORTEMENT THERMODYNAMIQUE DE L'AIR HUMIDE DANS UN PROCEDE DE DESSALEMENT D'EAU PAR HUMIDIFICATION – DESHUMIDIFICATION DE L'AIR.

M. Ben Amara*, I. Houcine, A. Guizani, M. Mâalej
(L.A.S) I.N.R.S.T, B.P 95 Hamam lif 2050 Tunisie, *E-mail: mahmoud.benamara@ipeit.rnu.tn

RESUME

Le but principal de ce travail est d'étudier théoriquement et expérimentalement le mode de fonctionnement des différents compartiments du procédé de dessalement d'eau de mer par humidification – déshumidification de l'air à multiples étages. Un étage est constitué par neuf capteurs suivis par un humidificateur. Notre approche théorique consiste à décrire le comportement du capteur par la méthode du bilan global et à effectuer une simulation numérique pour déterminer la température de sortie de l'air en utilisant comme base de données les résultats expérimentaux dans des conditions climatiques constantes de laboratoire. Notre approche expérimentale consiste à étudier expérimentalement, dans des conditions climatiques constantes de laboratoire, les performances d'un humidificateur à pulvérisation en fonction des débits et des températures d'entrée de l'air et de l'eau. Nous utilisons un échangeur de chaleur simulant nos capteurs solaires pour chauffer l'air. Les résultats obtenus permettent de déterminer le nombre d'étages assurant un fonctionnement optimal du procédé de dessalement.

Mots clés : Dessalement, Humidification, Capteur solaire, air humide

NOMENCLATURE

B:	Largeur du capteur m	T_{eau}	Température de l'eau à l'entrée de l'humidificateur °C
C_{eau} :	Chaleur massique de vapeur d'eau Kj/kgk	T_m	Température moyenne °C
C_p :	Chaleur massique de l'air Kj/kgk	T_s	Température de l'air à la sortie du capteur °C
G:	Flux solaire W/m ²	U_t	Coefficient de déperdition $W/m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$
M_{air}	Débit massique de l'air Kg/h	X_e	Teneur en eau de l'air à l'entrée de l'humidificateur Kg/Kg
$M_{air\ sec}$	Débit massique de l'air sec Kg/h	X_s	Teneur en eau de l'air à la sortie de l'humidificateur Kg/kg
M_{eau}	Débit massique de l'eau Kg/h	X_{s_sat}	Teneur en eau de l'air saturé à la sortie de l'humidificateur Kg/kg
$M_{s\ eau}$	Débit massique de l'eau à la sortie de l'humidificateur Kg/h	η	Rendement thermique du capteur %
S	Surface du capteur m ²	η_h	Rendement thermique de l'humidificateur %
T_a	Température ambiante °C	η_0	Rendement optique du capteur %
T_{ab}	Température de l'absorbeur °C	ϕ	Humidité relative de l'air %
T_e	Température de l'air à l'entrée du Capteur °C	ϕ_{sh}	Humidité relative de l'air à la sortie de l'humidificateur %
T_{eair}	Température de l'air à l'entrée de l'humidificateur °C	τ_v	Coefficient de transmission de la couverture transparente

1. INTRODUCTION

Nous nous intéressons à un procédé de dessalement d'eau de mer par humidification – déshumidification de l'air à multiples étages qui compte parmi les méthodes non conventionnelles de dessalement. L'installation est dimensionnée pour produire 1 m³ d'eau par jour. Les principaux composants de l'installation sont: l'humidificateur (évaporateur), le déshumidificateur (condenseur) et une source d'énergie (des capteurs solaires à air).

Le dessalement d'eau par humidification-déshumidification a fait l'objet de nombreux travaux dont celui de Garg et coll [1] qui ont pensé à installer un banc d'essai composé d'un capteur solaire à eau qui sert à chauffer l'eau avant son entrée dans l'humidificateur. Dans cet humidificateur, ils injectent de l'air qui s'humidifie et continue son chemin vers un déshumidificateur pour la condensation de la vapeur d'eau.

Mehta [2] a utilisé le même principe de Garg et coll [1] avec un circuit fermé, c'est à dire, qu'après sa condensation, l'air retourne vers l'humidificateur pour reprendre le même chemin. Mehta [3] a trouvé que cette méthode stabilise mieux l'opération dans le banc d'essai et réduit de 20% la perte de charge dans l'humidificateur.

Gahin et coll [4], ont présenté une compilation des travaux de recherche antérieurs à 1980 concernant le dessalement d'eau de mer par humidification-déshumidification de l'air en utilisant l'énergie solaire comme source d'énergie. Ils ont orienté leur intérêt aux effets des différents paramètres énergétiques sur l'évaporation et la condensation de la vapeur d'eau dont le but est d'avoir la procédure la moins onéreuse.

D'autres études concernant cette procédure de dessalement d'eau en utilisant une quantité d'énergie inférieure à celle faite dans les études précédentes sont ceux de Lerneur et Mills [5] qui ont proposé une méthode consistant à pomper l'eau de mer à une pression de 6 atm, en le mélangeant avec de l'air comprimé dans un éjecteur produisant à une vitesse élevée une petite quantité d'air humide, il se produit ainsi une évaporation et une distillation rapide de l'eau à une température de 30 °C.

Ben Bacha et coll [6], ont présenté une étude expérimentale et numérique du dessalement d'eau par humidification et déshumidification de l'air en utilisant l'énergie solaire comme source d'énergie. En effet, ils ont installé un banc d'essai avec un seul étage composé d'un capteur solaire à eau qui sert à chauffer l'eau avant son entrée dans l'humidificateur dans lequel ils injectent de l'air qui s'humidifie et continue son chemin vers un déshumidificateur pour la condensation de la vapeur d'eau.

Jusqu'à présent, les études qui se sont intéressées au procédé de dessalement d'eau par humidification et déshumidification de l'air, proposent de chauffer l'eau dans des capteurs solaires et d'utiliser l'air à la température ambiante. Par contre, dans notre cas, Chafik [7] a proposé de chauffer l'air par énergie solaire a fin d'augmenter sa capacité de renfermer de la vapeur d'eau au cours de la phase d'humidification.

Dans ce présent travail, nous nous intéressons à vérifier expérimentalement le procédé de dessalement de l'eau de mer par humidification-déshumidification de l'air et de déterminer l'efficacité de ce procédé. En fait, les travaux expérimentaux effectués sur un banc d'essais installé au laboratoire de l'université de Bochum (RUB) permettent de simuler expérimentalement le procédé de dessalement qui est en cours de construction à l'INRST.

2. MÉTHODOLOGIE EXPERIMENTALE ET INSTRUMENTATION

Le but de ce travail, est de vérifier expérimentalement le procédé de dessalement de l'eau de mer par humidification-déshumidification de l'air et de déterminer l'efficacité de ce procédé. En fait, les travaux expérimentaux ont été effectués sur un banc d'essais installé au laboratoire de l'université de Bochum [8] permettent de simuler expérimentalement le procédé de dessalement qui est en cours de construction à l'INRST [9].

L'installation est constituée de huit étages de chauffage (capteurs solaires plans à air) et d'humidification de l'air et se termine par une surchauffe de l'air au dernier étage et une déshumidification [figure 1]. Au laboratoire de, le banc d'essais est constitué d'un seul étage de chauffage (échangeur de chaleur simulant les capteurs solaires)-humidification et se termine par un déshumidificateur.

Dans ce travail, on va donc présenter les études expérimentales effectuées sur le banc d'essai en déterminant l'efficacité de l'humidificateur tubulaire pour chaque étage et le comportement thermodynamique de l'air humide dans les huit étages capteur solaire – humidificateur.

Le banc d'essai à un seul étage est constitué de : [figure .2].

Un ventilateur d'air (1) utilisé pour faire circuler le débit d'air désiré, un générateur de vapeur (4) est utilisé pour augmenter l'humidité de l'air à l'entrée de l'étage si nécessaire. Le générateur de vapeur est contrôlé par un régulateur qui mesure l'humidité de l'air à l'entrée de l'humidificateur. Si l'humidité est inférieure à la valeur désirée, une quantité de vapeur sera ajoutée automatiquement au débit d'air. Un agitateur (5) est utilisé pour obtenir une distribution homogène de la vapeur dans l'air. Un échangeur de chaleur (2), permet de régler la température du flux d'air à la valeur désirée. Cet appareil de chauffage de l'air simule les capteurs solaires de la station pilote. La température de l'eau qui coule dans l'échangeur de chaleur peut être réglée par un chauffage électrique (3), un tube-humidificateur (7), dans lequel on fait rentrer l'air conditionné et on injecte par pulvérisation de l'eau (sous une pression absolue de 6 bars et une température variable entre 20 et 65 °C), un déshumidificateur (10) qui est un échangeur de chaleur muni d'une colonne de condensation et une cuve millimétrée dans laquelle on rassemble l'eau distillée.

Avant le retour vers le ventilateur, l'air passe par un échangeur de chaleur supplémentaire (6) et un orifice (11). Le deuxième échangeur de chaleur (6) sert à diminuer l'humidité relative de l'air, qui est de 100% à la sortie du déshumidificateur, jusqu'à une humidité approximative de 80%. Cela permet d'empêcher la condensation dans les tubes et le ventilateur. Le banc d'essai fonctionne donc en boucle fermée.

La température de l'air à la sortie de l'échangeur ou à l'entrée de l'humidificateur est réglée selon sa valeur donnée par l'équation théorique simulant la température de sortie des capteurs solaires en tenant compte du débit

et de la température de l'air rentrant et de l'irradiation solaire. On effectue les expériences sur l'humidificateur en suivant les étapes suivantes:

- 1ère étape : on fixe la température de chauffage de l'air relative à la radiation désirée
- 2e étape : on fixe le débit massique de l'air humide sortant du ventilateur
- 3e étape : on fixe l'humidité absolue de l'air désirée à l'entrée de l'humidificateur en utilisant un système qui refroidit l'air avant son entrée dans le ventilateur.
- 4e étape : on fixe le débit et la température de l'eau injectée dans l'humidificateur aux valeurs désirées.
- 5e étape : après l'établissement du régime permanent du banc d'essais, on prélève les mesures.

Après avoir effectué ces étapes, on termine ainsi la simulation du premier étage et on recommence les mêmes étapes pour les étages suivants en donnant la valeur de la teneur en eau à l'entrée de l'humidificateur celui de la sortie du déshumidificateur de l'étage précédent, en changeant aussi la valeur du débit massique de l'air humide de telle sorte qu'on laisse le débit d'air sec fixe, et ainsi de suite jusqu'au huitième étage.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. SIMULATION DU CAPTEUR SOLAIRE

Des études expérimentales ont été effectuées sur le capteur solaire plan à air utilisé dans le procédé de dessalement [10], ont permis de corréler le rendement du capteur solaire en fonction de la température réduite par l'équation suivante :

$$h = -0.4985 \cdot Tr + 0.63714 = -4.985 \frac{(T_m - T_a)}{G} + 0.63714 \quad (\text{Eq.1})$$

$$\text{Où la température réduite } Tr \text{ est donnée par : } Tr = u_0 \frac{T_{ab} - T_a}{G} \approx u_0 \frac{T_m - T_a}{G} \quad (\text{Eq.2})$$

$$\text{Où } u_0 \text{ représente un coefficient de dimensionnement : } u_0 = 10 \text{ w m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (\text{Eq.3})$$

On utilise l'équation du rendement en fonction de la température réduite (Eq.1) déduite expérimentalement, comme base de données pour calculer la température de l'air à la sortie du capteur.

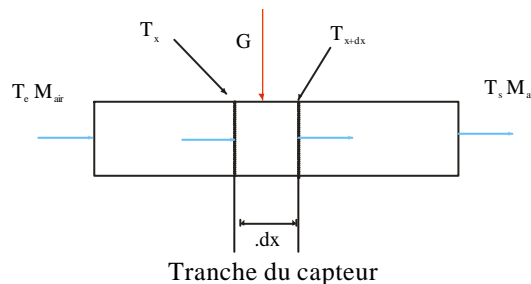
Généralement, l'équation du rendement du capteur est donnée par le modèle global suivant :

$$\eta = \frac{M_{\text{air}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{G \cdot S} \quad (\text{Eq.4})$$

On peut écrire l' Eq. 4 aussi:

$$\eta \cdot G \cdot S = M_{\text{air}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \quad (\text{Eq.5})$$

En considérant des éléments infinitésimaux du capteur de longueur dx



On peut écrire Eq.6 ainsi

$$\eta \cdot G \cdot dx \cdot B = M_{\text{air}} \cdot C_p \cdot (T_{x+dx} - T_x) \quad (\text{Eq.6})$$

Où B est la largeur du capteur en mètre, T_x et T_{x+dx} sont les températures à l'entrée et à la sortie d'un petit élément du capteur en $^\circ\text{C}$.

Le rendement du capteur peut être écrit sous la forme suivante :

$$h = h_0 - \frac{U_t}{u_0} \times Tr \quad \text{où } h_0 = a_{ab} \times t_v \quad (\text{Eq.7})$$

En remplaçant la température réduite par sa valeur dans l'équation théorique (Eq 7), confirmée par nos résultats expérimentaux, nous pouvons écrire :

$$\eta(Tr) = \eta_0 - \frac{U_t}{u_0} \cdot Tr = \eta_0 - \frac{U_t}{G} \cdot \left(\frac{T_x + T_{x+dx}}{2} - T_a \right) \quad (\text{Eq.8})$$

En remplaçant l'expression du rendement dans l'équation Eq. 8 par sa valeur donnée par l'équation Eq.6 on obtient :

$$\left(\frac{U_t}{G} \cdot \left(\frac{T_x + T_{x+dx}}{2} - T_a \right) + \eta_0 \right) G \cdot dx \cdot B = M_{air} \cdot C_p \cdot (T_{x+dx} - T_x) \quad (\text{Eq.9})$$

En effectuant un développement limité de $T(x)$, et en nous limitant au premier ordre, on obtient une équation différentielle linéaire de la forme :

$$a \cdot \frac{\partial T_x}{\partial x} + b \cdot T_x = c \quad (\text{Eq.10})$$

La solution de l'équation différentielle du premier ordre est donnée par:

$$T_x = \left(T_0 - \frac{c}{b} \right) \exp\left(-\frac{b}{a} X\right) + \frac{c}{b} \quad (\text{Eq.11})$$

Où T_0 est la température d'entrée en °C et X est la longueur du capteur en mètre.

Dans notre cas l'équation s'écrit en fonction de la température, du débit d'air d'entré et de l'ensoleillement .

$$T_s = \left(T_e - \frac{G}{4.99} (4.99 T_a + 0.637) \right) \exp\left(\frac{4.99 \times 41.1}{M_{air} \times C_p} + \frac{G}{4.99} (4.99 T_a + 0.637) \right) \quad (\text{Eq.12})$$

3.2. ETUDE EXPERIMENTALE EFFECTUÉE SUR L' HUMIDIFICATEUR

Nous présentons les résultats expérimentaux relatifs au comportement de l'humidificateur en faisant varier les principaux paramètres de fonctionnement, à savoir, le rapport des débits massiques eau/air, la teneur en eau de l'air, le débit massique d'air et le flux solaire.

3.2.1. EFFET DU RAPPORT DES DEBITS MASSIQUES ($r = M_{eau}/M_{air \text{ sec}}$)

Nous considérons un ensoleillement proche de 590 w/m² qui est la moyenne annuelle du flux solaire à Tunis [11]. On teste un seul étage pour un rapport des débits variables à l'entrée de l'humidificateur.

Les autres conditions de l'expérience sont :

- Une humidité absolue de l'air égale à la valeur de 0,047 kg/kg.
- Un débit de l'air humide à la sortie du ventilateur : $M_{air \text{ humide}} = M_{air \text{ sec}} (1 + X_c) = 826 \text{ kg/h}$.
- Une température de l'eau injectée dans l'humidificateur de 60°C, puis on fait varier chaque fois le débit d'eau injectée dans l'humidificateur. On considérera la vitesse du vent nulle.

Les résultats des expériences sont donnés sur les figures 3 et 4.

Le phénomène de l'évaporation est caractérisé par un échange simultané de chaleur et de matière. Du fait du contact air-eau dans l'humidificateur, la chaleur est transportée à l'eau en cours de l'évaporation, tandis que, simultanément, une partie de ses éléments passe dans l'air à l'état de vapeur. Ce phénomène explique la variation de teneur en eau de l'air en fonction du rapport des débits dans notre cas. En effet :

La branche croissante de la courbe de variation de la teneur en eau de l'air en fonction du rapport des débits est illustrée sur la figure 3, elle montre que le pouvoir d'évaporation de l'eau augmente en augmentant la quantité d'eau dans l'humidificateur. Cela implique que la chaleur transportée est encore suffisante pour permettre l'échange de chaleur-matière entre l'eau et l'air tout le long de cette branche. La branche décroissante de la courbe illustrée par la figure 3, montre que la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air diminue en augmentant la quantité d'eau dans l'humidificateur, ceci implique que la chaleur transportée par l'air diminue aussi. La diminution du transfert de chaleur de l'air vers l'eau est due à la diminution de la température du mélange air-eau en augmentant la quantité d'eau dans l'humidificateur. En effet, après que la teneur en eau de l'air (X_s) atteint une valeur proche de celle correspondant à la saturation ($X_{s, \text{sat}}$), l'excédent d'eau en contact avec l'air ($T_{\text{eau}} = 60^\circ\text{C}$) va refroidir l'air dans l'humidificateur ($T_{\text{air}} = 78^\circ\text{C}$) ce qui entraîne une diminution du pouvoir d'absorption de la vapeur d'eau par l'air. Mais (X_s) reste toujours proche de la valeur de la saturation ($X_{s, \text{sat}}$) à la température considérée. Ceci implique que le rendement de l'humidificateur (η_h) est proche de 100% dans cet intervalle de rapport des débits (r) (figure 4).

Ces résultats nous renseignent sur la valeur optimisée du rapport des débits qu'il faut utiliser pour la suite de nos études expérimentales. Cette valeur est celle donnant en même temps le meilleur rendement de l'humidificateur et une teneur en eau de l'air à la sortie la plus élevée. Pour la suite des expériences, nous travaillerons avec un rapport de débit proche de 43%.

3.2.2 EFFET DE LA TENEUR EN EAU DE L'AIR A L'ENTREE (X_e)

Les données expérimentales sont les suivantes :

- L'insolation est $G = 590 \text{ W/m}^2$, le débit massique de l'air sec à l'entrée de l'humidificateur est $M_{\text{air sec}} = 790 \text{ kg/h}$, la température ambiante $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, la température d'eau injectée est $T_{\text{eau}} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ et la teneur en eau à l'entrée de l'humidificateur pour le premier étage est $X_e = 0,020 \text{ kg/kg}$.

- La teneur en eau de l'air à l'entrée de l'humidificateur du deuxième étage sera prise égale à la valeur de la sortie du premier étage et ainsi de suite jusqu'au huitième étage.

La figure 5 illustre l'évolution du rendement de l'humidificateur en fonction de la teneur en eau de l'air (X_e). On remarque que le rendement de l'humidificateur décroît en augmentant la quantité de vapeur dans l'air à l'entrée. Ceci nous permet de conclure que le rendement de l'humidificateur diminue en allant d'un étage à l'autre. Dans le pire des cas, c.à.d au huitième étage, le rendement de l'humidificateur ne descend pas en dessous de 75% ce qui nous mène à dire que l'humidificateur donne une bonne efficacité pour les huit étages utilisés par ce procédé. Le diagramme de Mollier, illustré par la figure 6 représente les caractéristiques thermodynamiques de l'air humide tout le long des huit étages. En effet le diagramme montre qu'en augmentant la teneur en eau de l'air à l'entrée de l'humidificateur, l'écart ($X_s - X_e$) diminue ce qui implique que la quantité d'eau absorbée diminue d'un étage à l'autre. Le diagramme montre aussi qu'une humidification adiabatique aura lieu pour les valeurs d'humidité absolue (X_e) comprises entre 90 et 120 g/kg. En effet au cours de ce stade, l'échange chaleur matière entre eau et air est maximum et la teneur en eau de l'air sortant de l'humidificateur est proche de celle de la saturation ($X_s = X_{s_sat}$)

3.2.3 EFFET DU DEBIT MASSIQUE DE L' AIR A L' ENTREE DE L' HUMIDIFICATEUR(M_{air}).

Dans cette étude, on essaye de voir le comportement de l'humidificateur avec différents débits massiques de l'air rentrant dans l'humidificateur sous les mêmes conditions que l'expérience précédente. En effet, nous faisons varier le taux d'humidité de l'air à l'entrée de l'humidificateur, et laissant fixe chaque fois la valeur du rapport du débit ($r = M_{\text{eau}}/M_{\text{air sec}} = 43\%$), pour plusieurs valeurs de $M_{\text{air sec}}$ (600, 790 et 930 kg/h).

La figure 7 illustre l'évolution du rendement de l'humidificateur en fonction de la teneur en eau de l'air (X_e) pour différents débits massiques d'air sec. On remarque que le rendement de l'humidificateur augmente en augmentant le flux de l'air en suivant les mêmes allures des courbes. Nous constatons aussi que l'écart entre les courbes correspondant aux débits $M_{\text{air sec}} = 790 \text{ kg/h}$ et $M_{\text{air sec}} = 600 \text{ kg/h}$ est plus important que ce lui entre $M_{\text{air sec}} = 790 \text{ kg/h}$ et $M_{\text{air sec}} = 930 \text{ kg/h}$. Le rendement atteint une valeur maximale pour ces conditions.

La figure 8 (diagramme de Mollier) illustre les caractéristiques thermodynamiques de l'air humide tout le long des huit étages pour différents débits massiques d'air sec. Ce diagramme montre que pour les débits massiques d'air $M_{\text{air sec}} = 790$ et 930 kg/h , on peut se rapprocher de la courbe de saturation. La condensation de l'air humide à la sortie de l'humidificateur pour ces deux valeurs de débit ne nécessite pas une grande énergie de refroidissement. Par contre pour le débit d'air ($M_{\text{air sec}} = 600 \text{ kg/h}$), la condensation de l'air humide demande une énergie de refroidissement plus importante. La difficulté de se rapprocher de la courbe de saturation pour ($M_{\text{air sec}} = 600 \text{ kg/h}$) est due à la température élevée de l'air humide à la sortie de l'humidificateur. Cela est dû au fait que l'échange chaleur matière entre l'air et l'eau à l'intérieur de l'humidificateur n'est pas complet.

Le diagramme de Mollier (figure 8), montre que l'humidification adiabatique de l'air commence à partir du troisième étage ($X_e = 68 \text{ g/kg}$) pour le flux massique de l'air ($M_{\text{air sec}} = 930 \text{ kg/h}$) alors que pour la valeur de $M_{\text{air sec}} = 790 \text{ kg/h}$ elle commence à partir du quatrième étage ($X_e = 90 \text{ g/kg}$), tandis que pour $M_{\text{air sec}} = 600 \text{ kg/h}$ elle commence à partir du cinquième étage ($X_e = 97 \text{ g/kg}$). Ces résultats montrent que si on augmente le débit massique de l'air rentrant dans l'humidificateur, la teneur en eau de l'air à la sortie commence à se rapprocher de la valeur de saturation.

3.2.3. EFFET DU FLUX SOLAIRE

Dans cette expérience, on considère les conditions expérimentales suivantes :

- Les valeurs du flux solaire testées sont $G \sim 590$ et 800 W/m^2 , la température de l'eau injectée dans l'humidificateur : $T_{\text{eau}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ et les valeurs du débit massique d'air sec expérimentées sont $M_{\text{air sec}} = 790$ et 930 kg/h .

Plusieurs problèmes liés à la réalisation technique ont été rencontrés lors de cette expérience. On ne peut pas tester les faibles débits massiques d'air pour une valeur élevée du flux solaire ($G = 800 \text{ W/m}^2$), ceci risque de détruire l'humidificateur. De même, nous ne pouvons pas tester les débits massiques de fortes valeurs puisque l'échangeur de chaleur que nous utilisons comme simulateur du capteur solaire ne peut fonctionner à la fois avec une température voisine de $90 \text{ }^\circ\text{C}$ et un flux massique supérieur à 1000 kg/h . Pour la radiation $G = 800 \text{ W/m}^2$, on ne peut commencer l'expérience que dès le premier étage c.à.d pour $X_e \sim 20 \text{ g/kg}$ parce que le système de refroidissement de l'air sortant du déshumidificateur est d'efficacité limitée. En effet dans ce cas, on commence l'expérience pour cette radiation avec le second étage c a d pour $X_e \sim 0,047 \text{ kg/h}$.

La figure 9 illustre l'évolution du rendement de l'humidificateur en fonction de la teneur en eau de l'air (X_e) pour différents débits massiques d'air sec ($M_{\text{air sec}} = 790$ et 930 kg/h) avec des flux de radiation solaire

variables ($G = 800 \text{ w/m}^2$ et $G = 590 \text{ w/m}^2$). On remarque que pour les deux valeurs de débits massiques d'air ($M_{\text{air sec}} = 790$ et 930), le rendement de l'humidificateur est indépendant de la valeur de la radiation solaire G de valeur comprise entre 590 et 800 W/m^2 .

Le diagramme de Mollier (figure 10) illustre les caractéristiques thermodynamiques de l'air humide tout le long des huit étages pour différents flux solaires avec un débit massique d'air sec constant ($M_{\text{air sec}} = 790 \text{ kg/h}$). Ce diagramme montre que l'écart de l'humidité absolue entre deux étages augmente en augmentant le flux d'air. Ce qui montre l'importance de l'effet de la radiation. En effet, en chauffant, l'air on augmente sa capacité d'absorption d'eau à l'intérieur de l'humidificateur. On remarque aussi que l'humidification adiabatique de l'air commence à partir du troisième étage ($X_e = 75 \text{ g/kg}$) pour le flux solaire ($G = 800 \text{ w/m}^2$) alors que pour $G = 590 \text{ w/m}^2$ elle commence à partir du quatrième étage ($X_e = 90 \text{ g/kg}$). Ces résultats montrent que si on augmente le flux solaire, le teneur en eau de l'air à la sortie de l'humidificateur commence à se rapprocher de la valeur de saturation

4. CONCLUSION

Les travaux effectués sur le banc d'essai nous ont permis de déterminer les conditions optimales de fonctionnement du procédé de dessalement par humidification-déshumidification de l'air par énergie solaire et notamment les paramètres de dimensionnement qu'exige une production d'eau optimale sur le rendement globale :

- Un rapport des débits eau/air $r = 43 \%$
- Une température d'air à l'entrée de l'humidificateur proche de $T_{\text{air}} = 80^\circ\text{C}$
- Une température d'eau à l'entrée de l'humidificateur proche de $T_{\text{eau}} = 60^\circ\text{C}$
- On utilise cinq étages chauffage-humidification

Remerciements: Les auteurs remercient la Communauté Européenne qui a financé ce travail dans le cadre d'un projet INCO-DC (référence : IC 18 –CT98-0265) et le ministère de l'enseignement supérieure, de la recherche et de la technologie pour son financement complémentaire dans le cadre de contrat de programme.

FIGURES

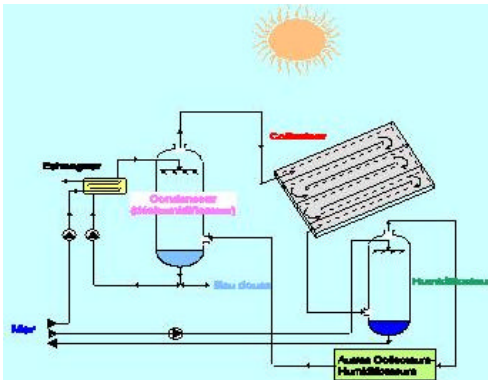


Figure 1 : Schéma de l'installation à l'INRS

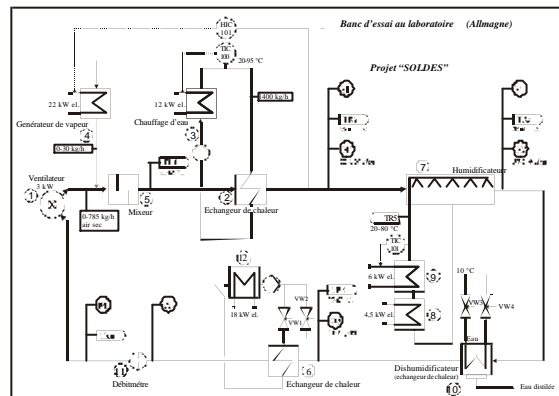


Figure 2 : Description schématique du banc d'essai à RUB

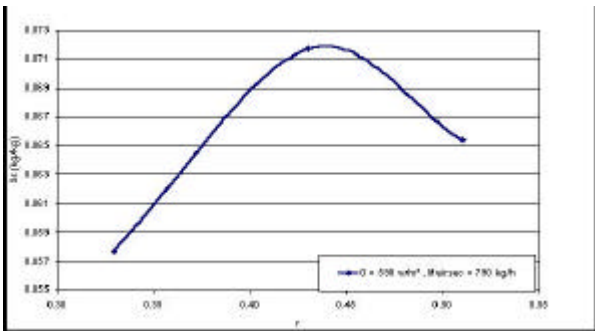


Figure 3 : Humidité absolue de l'air à la sortie de l'humidificateur en fonction du rapport des débits eau/air ($G = 590 \text{ w/m}^2$, $M_{\text{air sec}} = 790 \text{ kg/h}$, $T_{\text{eau}} = 60^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}} = 78^\circ\text{C}$).

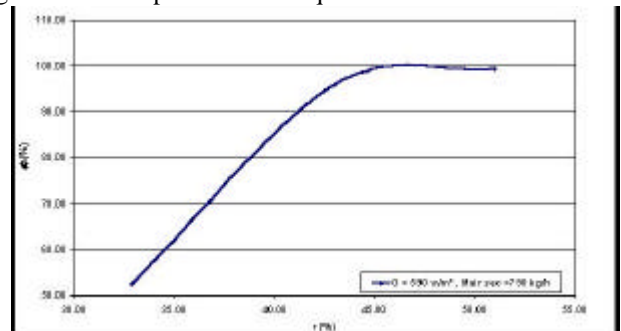


Figure 4 : Rendement de l'humidificateur en fonction du rapport des débits eau/air ($G = 590 \text{ w/m}^2$, $M_{\text{air sec}} = 790 \text{ kg/h}$, $T_{\text{eau}} = 60^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}} = 78^\circ\text{C}$)

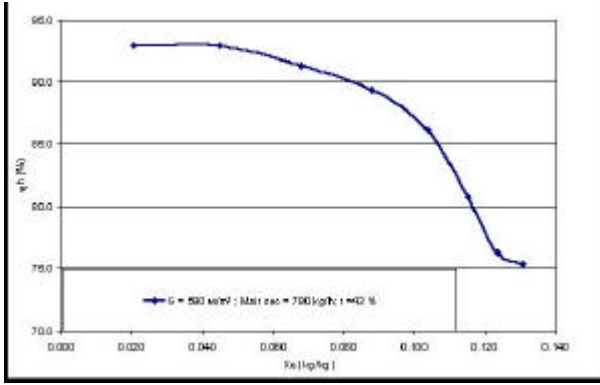


Figure 5 :Rendement de l'humidificateur en fonction de la teneur en eau de l'air à l'entrée de l'humidificateur ($G = 590 \text{ W/m}^2$, $M_{\text{air sec e}} = 790 \text{ kg/h}$ et $r = 43 \%$).

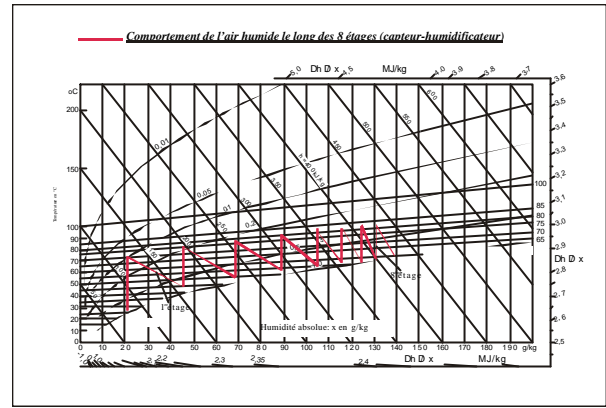


Figure 6 :Diagramme de Mollier ($G = 590 \text{ W/m}^2$, $M_{\text{air sec e}} = 790 \text{ kg/h}$ et $r = 43 \%$)

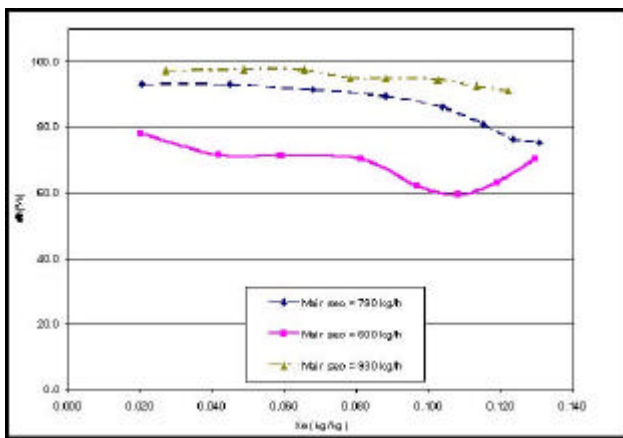


Figure 7 :Rendement de l'humidificateur en fonction de la teneur en eau de l'air à l'entrée de l'humidificateur ($G = 590 \text{ w/m}^2$, $r = 43\%$)

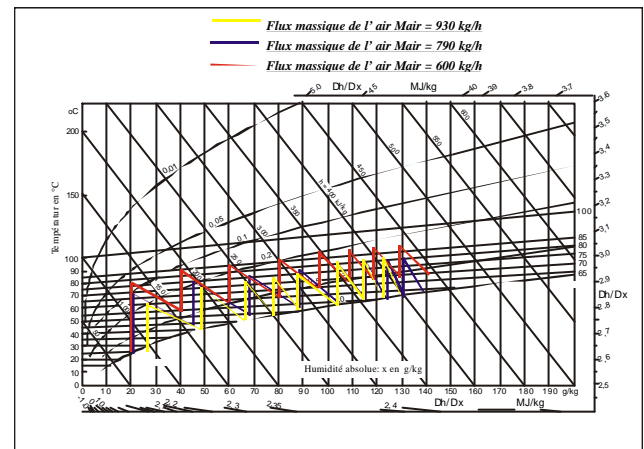


Figure 8 :Diagramme de Mollier ($G = 590 \text{ w/m}^2$, $r = 43\%$).

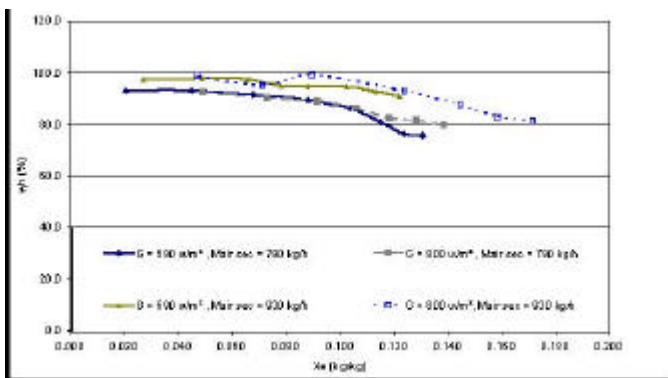


Figure 9 :Rendement de l'humidificateur en fonction de la teneur en eau de l'air à l'entrée de l'humidificateur ($r = 43\%$).

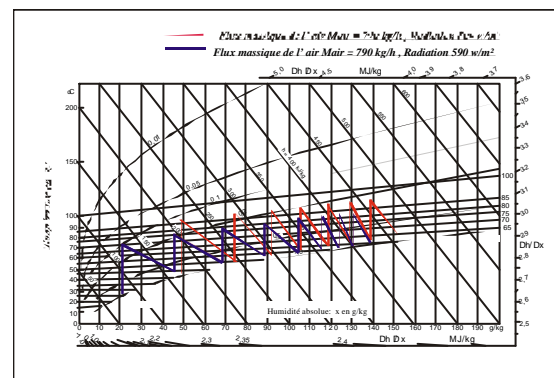


Figure 10 :Diagramme de Mollier ($r = 43 \%$, $M_{\text{air sec}} = 790 \text{ kg/h}$)

6. REFERENCES

- [1] Garg s.k., Mehta M. H. and Datta R.L., “*conversion of sea water into pure water for boilers and other industrial purposes*“, Seminar on water treatment for industries, Ind. Chem. Manuf., Bombay, June - July 1967.
- [2] Garg s.k., Mehta M. H., Gomkabe S.d. and Datta R.L., “*experience in the operation of H-D - technique of water desalination*“, conference on water desalination, Bhavnagar, November 1967.
- [3] Mehta M.H., Cent. Salt Mar. Chem. Res. Inst., Bhavnagar, India, Indian chem. Eng. 14 (3), 3-7,1972.
- [4] Gahin, S., Darwish M.A., and Ghazi M.A., King Abdul Aziz univ., Jeddah, Saudi Arabia, Proc. Int. Symp. “*Fresh water sae*“, 7th, v.2, 229th Event of the Eur Fed of Chem. Eng., Amsterdam, Netherlands, sep. 23-26, 1980 , Available from work party on fresh water from the sea , Athens, Greece, p.399-406.
- [5] lerner E., Mills W.J., Nat Resour, Forum 2, 399-404,1978.
- [6] Ben Bacha H., Ben Ayed, Maalej A., M.S. ABID, “*Modélisation thermique d’une unité de dessalement de l’eau par l’énergie solaire*“, PP. 741-752, Proc. des 7emes JITH, Marrakech, Maroc, 3-6 avril, 1995.
- [7] Efat Chafik, “*A new seawater desalination process using solar energy*“, Desalination 153 (2002), pp 25-37
- [8] Mahmoud Ben Amara. “*Contribution à l’étude d’un procédé de dessalement d’eau de mer par humidification et déshumidification de l’air*“, DEA en Mécanique Appliquée des Fluides et des Transferts Thermiques, FST. Novembre 2001
- [9] Imed Houcine (INRST), Proposition d’un projet de recherche-développement INCO-DC (Commission Européenne), “*Développement et optimisation d’un nouveau procédé de dessalement d’eau de mer par l’énergie solaire*“ (SOLDES), Août 1997
- [10] M. Ben Amara, A. Ben Ezzine, I. Houcine, A.Guisani, M. Mâalej. “*Développement et caractérisation de capteurs solaires plans à air utilisés dans un procédé de dessalement par humidification-déshumidification de l’air*“. 4èmes Journées Tunisiennes sur les Ecoulements et les Transferts, Hammamet, Décembre 2002
- [11] Fethi Ben Jemaa, Imed Houcine, Mohamed Hachmi-Chahbani, Desalination in Tunisia: “*Past experience and future prospects*“, Desalination 116 (1998) 123-134