

Mesure et Caractérisation Thermodynamique d'un Nouveau Système Solaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupération de Chaleur.

A. Khedim

Institut Solaire de l'Université des Sciences Appliquées de Aachen, Faculté de Jülich. Heinrich-Mußmann-Str. 5.
D-5242 Jülich / Allemagne. Tel. : 0049 2461/99-3521 , fax : 0049 2461/99-3570,
e-mail khedim@sj.fh-aachen.de , web <http://www.sj.fh-aachen.de>

Résumé - Soixante-dix pour cent de la surface de la terre sont couverts par l'eau. Cependant, beaucoup de régions du monde souffrent d'un manque de l'eau potable. L'eau de rivière est rarement accessible en quantité adéquate et souvent pas en qualité qui correspond aux normes admises d'hygiène. Pour parer ce manque de l'eau, de divers processus techniques ont été donc développés pendant les dernières décennies dans le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. Ces techniques, cependant, exigent de grands investissements qui sont fréquemment au delà des moyens des pays en voie de développement. L'approvisionnement en eau potable avec les besoins modestes de l'eau peut être assuré par la construction des distillateurs solaires avec lesquels l'eau de mer peut être desalinisée et l'eau de la qualité suffisante peut être rendue potable. En récupérant et en réutilisant la même quantité d'énergie thermique plusieurs fois, il a été possible de réduire toute l'énergie nécessaire dans la mesure où de l'énergie solaire peut maintenant être vue comme source d'énergie acceptable pour le dessalement de l'eau. Les pays au sud du bassin méditerranéen font partie de ces régions du monde où les ressources en eau potable sont extrêmement limitées. Une grande partie des réserves d'eau est constituée d'eau saumâtre.

Abstract - Seventy percent of the Earth's surface is covered by water. However, many regions of the world suffer from a lack of potable water. River water is rarely accessible in adequate quantities and often not of a quality that corresponds to accepted hygiene standards. Along coastlines, wells contain brackish water of little or no use to households. To counter this lack of water, various technical processes have, therefore, been developed over the last decades to desalinate sea water and brackish water. These techniques, however, require large investments which are frequently beyond the means of developing countries. The supply of potable water to settlements with modest water needs such as fishing villages along the coast can be ensured through the construction of solar stills with which sea water can be desalinated and water of insufficient quality can be made potable. By recuperating and reusing the same quantity of thermal energy several times over, it has been possible to reduce the total energy needed to the extent that solar energy can now be seen as an acceptable energy source for water desalination.

1. INTRODUCTION

Les pays au sud du bassin méditerranéen font partie de ces régions du monde où les ressources en eau potable sont extrêmement limitées. Une grande partie des réserves d'eau est constituée d'eau saumâtre. Les précipitations sont très variables aussi bien dans l'espace que dans le temps. La sécheresse peut durer des mois ; elle est parfois suivie par des pluies torrentielles qui emportent tout sur leur passage, comme ce qui s'est passé en octobre 2001 à Alger où un millier de personnes ont été ensevelies par un torrent de boue. Si je me réfère au thème de ces travaux, c'est justement en été où le dessalement de l'eau de mer à l'énergie solaire est le plus rentable et où la demande est la plus urgente que l'eau potable est distribuée aux compte-gouttes.

En général, toutes les eaux naturelles contiennent des sels dissous; leur concentration varie suivant l'origine et la qualité de l'eau utilisée. Le contenance en sels de l'eau de mer n'est pas partout la même comme l'indique l'exemple de deux cas extrêmes :Mer du Nord - 39.0 g/l Mer Noir -1.3 g/l. Pour répondre au déficit d'eau dans le monde, divers procédés techniques ont été développés, ces dernières décennies pour déminéraliser l'eau de mer.

Parmi les plus connus, il y a les processus thermiques comme

- la distillation à plusieurs étages (Multiple Stage Flash [MSF])
- la distillation à plusieurs effets (Multiple Effet Distillation [MED]) ou
- l'osmose inverse (Reverse Osmosis [RO]), basé sur le rejet des sels contenus dans l'eau à l'aide de membranes semi-perméables.

L'utilisation de tous ces procédés, dont la capacité de production varie entre 100 et 100 000 m³ par jour exige, cependant, de gros investissements que la plupart des pays en développement ne possèdent pas. L'alimentation en eau potable de lotissements à consommation modeste tels les hameaux de pêcheurs, le long des côtes, peut être assurée par la construction de distillateurs solaires permettant de déminéraliser l'eau de mer ou de rendre potable une eau dont la qualité qui ne répond pas aux normes d'hygiène.

Le but de ces travaux est d'entreprendre des mesures thermodynamiques pour étudier un système de

distillation d'eau de mer à étages multiples avec récupération de chaleur, tout à fait nouveau.

Cette contribution doit être considérée comme base pour d'autres travaux d'amélioration de ce type de distillateur. Il s'agit donc de trouver un mode de fonctionnement permettant au distillateur d'obtenir le meilleur rendement, lorsque l'énergie thermique est plusieurs fois récupérée.

2. Le distillateur simple

La technique de dessalement de l'eau de mer par l'énergie solaire utilisant un distillateur simple, basée sur le principe de l'effet de serre n'est pas nouvelle; ce processus d'évaporation a été pour la première fois utilisée à grande échelle en 1872 à Las Salinas, au nord du désert chilien pour alimenter en eau potable les chantiers travaillant dans les mines de nitrates.

Le distillateur et le capteur solaire font partie de la même unité et l'énergie thermique n'est utilisée qu'une fois. Une telle installation se compose d'un bassin recouvert d'une couche noire absorbante et d'un recouvrement transparent en verre ou parfois en plastique mis en pente (figure1).

L'augmentation de la température due à l'effet de serre réchauffe l'eau qui s'évapore. La capacité d'évaporation augmente en fonction de la température jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau : l'humidité relative est alors à 100%. La vapeur d'eau que contient l'air chaud est refroidie par l'ambiance et se condense au vitrage. Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent à la partie inférieure du vitrage dans une gouttière qui conduit au réservoir stockage.

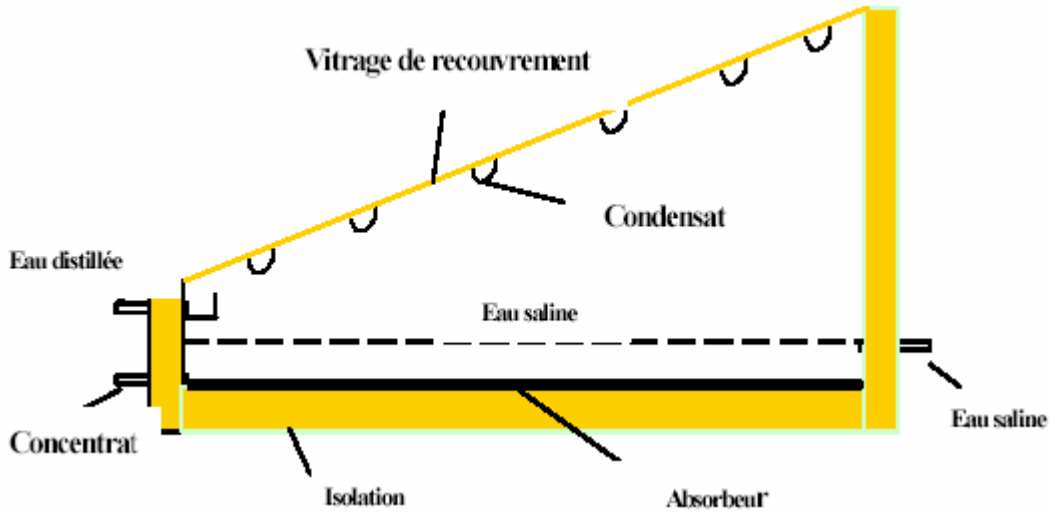


Fig. 1 : Principe de construction d'un distillateur solaire simple

2.1 Bilans énergétiques dans un distillateur simple

La théorie d'un distillateur solaire simple en forme de serre, est présentée par Malik et al (1982). Elle est fondée sur trois bilans de rendement (figure 2) :

1) Le bilan vitrage, 2) celui de la masse d'eau et 3) celui de l'absorbent au sol,

1) - Pour le vitrage (Indice V)

$$m_v c_v \frac{dT_v}{dt} = (1 - \rho_v) \cdot \alpha_v \cdot G + \dot{q}_{ra,i} + \dot{q}_{conv,i} + \dot{q}_{\text{évap},i} - \dot{q}_a$$

2) - Pour l'eau (Indice W de water)

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = (1 - \rho_v) \cdot (1 - \alpha_v) \cdot \alpha_w \cdot G - \dot{q}_{ra,i} - \dot{q}_{conv,i} - \dot{q}_{\text{évap},i} + \dot{q}_w$$

3)- Pour l'absorbent du bassin (Indice b)

$$(1 - \rho_v) \cdot (1 - \alpha_v) \cdot (1 - \alpha_w) \cdot \alpha_b \cdot G = \dot{q}_{\text{cond}} + \dot{q}_w$$

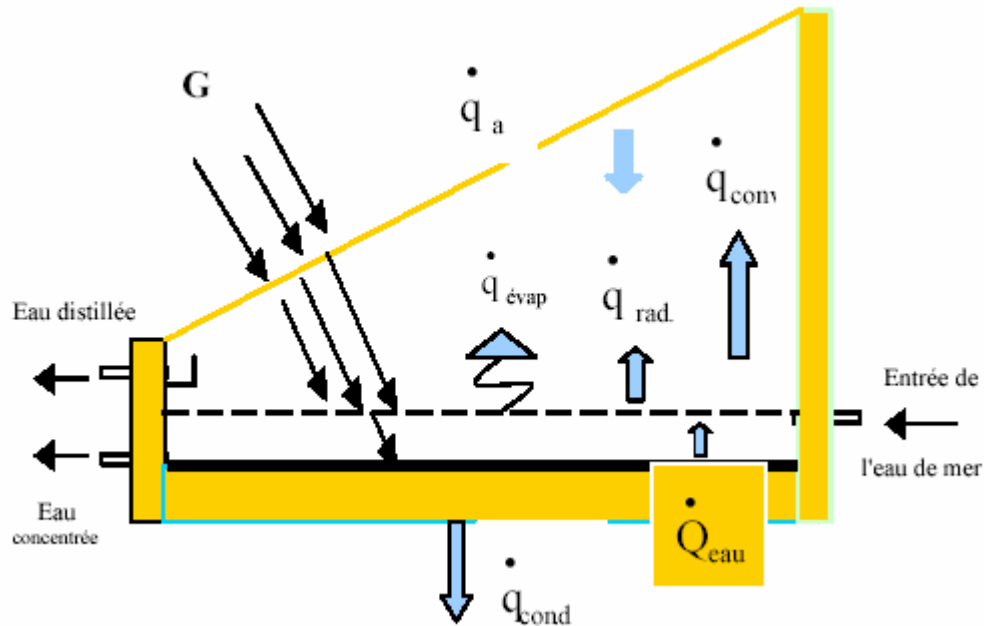


Fig. 2 : Bilans énergétiques d'un distillateur solaire simple

A l'aide de ces trois équations de base, on peut décrire le déroulement des processus dans le distillateur simple et calculer la production de l'eau potable en fonction des conditions de l'ambiance, en fonction des propriétés des substances et en tenant compte des différentes géométries des composants du système . La production d'eau potable spécifique par jour m_w d'un distillateur simple est évaluée par la formule suivante:

$$m_w = \frac{\text{Energie Solaire utilisée}}{\text{Energie spécifique pour la production d'un kg d'eau}}$$

$$m_w = \frac{Q_{\text{utilisée}}}{q_{\text{spécifique}}} = \frac{\eta Q_b}{r + C_w \cdot \Delta T}$$

L'énergie spécifique pour la production d'un kg d'eau potable se compose de la chaleur spécifique d'évaporation r (chaleur latente) et de l'énergie spécifique d'échauffement : $c_w \cdot T$ (chaleur sensible)

Le rendement d'un distillateur solaire simple : Le rendement est le rapport entre le débit thermique par évaporation et le rayonnement solaire incident.

$$\eta = \frac{h_{\text{évap}} \cdot \dot{m}_{\text{dist}}}{G}$$

$h_{\text{évap}}$: enthalpie d'évaporation [J/kg]

\dot{m}_{dist} : débit de masse de distillat [kg/m².s]

G : Puissance du rayonnement solaire incident Par unité de surface [W/ m²]

3. DISTILLATEUR SOLAIRE A ETAGES MULTIPLES AVEC RECUPERATION DE CHALEUR

Contrairement au distillateur simple décrit précédemment, le système de distillation présenté dans ce travail se compose de deux unités différentes : la source de chaleur (un capteur solaire ou autre) et l'unité de distillation. Le distillateur est basé sur la construction d'un bâti constitué de plusieurs bassins contenant de l'eau saline, superposés les uns sur les autres et qu'on qualifie d'étages (Figure 3)

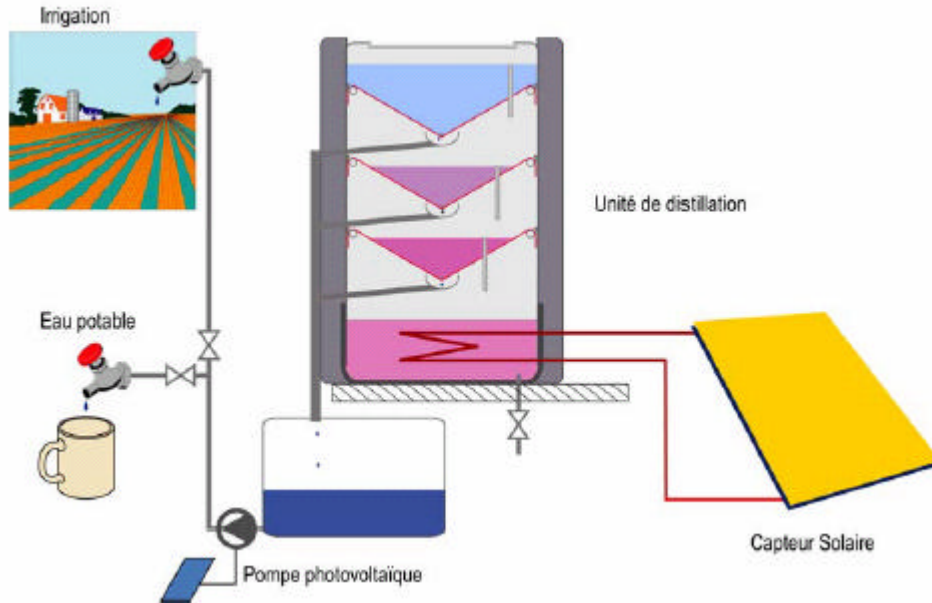


Fig. 3 : Schémas d'un distillateur solaire à étages multiples

3.1 Fonctionnement du distillateur à étages multiples

Seul, le bassin inférieur (1) est alimenté en énergie thermique (figure 4). Lorsque l'eau de ce bassin est réchauffée, elle s'évapore et se condense à la surface inférieure du bassin conique situé au-dessus (2). Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière (3) qui les conduit au stockage. A la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de conversion de phase, appelée aussi l'enthalpie d'évaporation, est libérée. Cette énergie réchauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense à la surface inférieure de l'étage suivant (4) et ainsi de suite...

De cette manière, l'énergie, prévue pour réchauffer l'eau du bassin inférieur, est récupérée, du moins en grande partie, pour être plusieurs fois utilisée. Ce processus de récupération de chaleur a un effet multiplicateur sur la production d'eau potable. Le remplissage du distillateur s'effectue à partir du dernier étage : le système est alimenté en eau saline à un débit deux fois élevé que à celui de l'eau évaporée. cette quantité d'eau injectée continuellement à travers les tuyaux de débordement (6) a pour but :

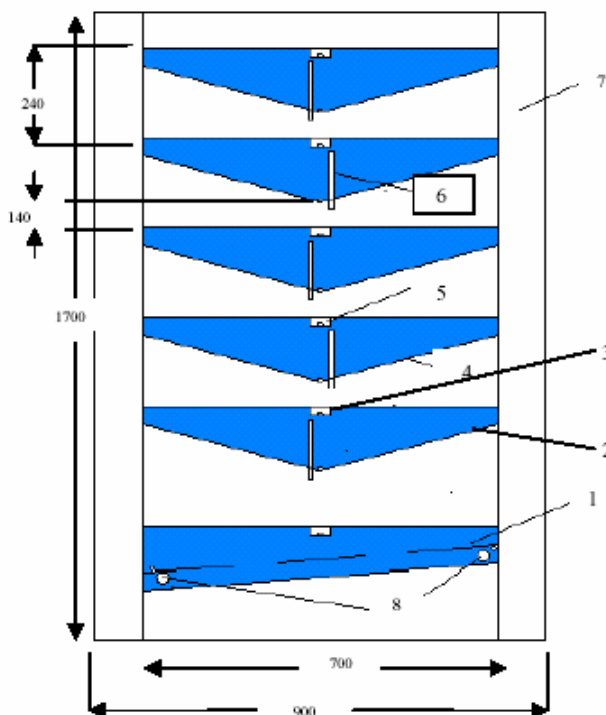
- de compenser la quantité d'eau évaporée,
- d'éviter une accumulation des sels dans les bassins et
- de contribuer à conserver les gradients de température entre les étages.

Le circuit entre le capteur solaire à l'unité de distillation fonctionne en thermosiphon ; il n'y a donc pas de pompe nécessitant une source d'énergie supplémentaire qui risque de ne pas exister dans ces régions retirées. Pour éviter une surpression, une huile végétale est utilisée comme fluide caloporteur car la température peut dépasser les 100°C.

L'installation de dessalement peut fonctionner 24 heures sur 24, lorsqu'on combine la chaleur provenant des capteurs solaires à celle récupérée d'un groupe électrogène. Tout en assurant une alimentation électrique au hameau, la chaleur provenant du groupe peut être récupérée et utilisée pour le dessalement de l'eau, lorsque le soleil est absent, particulièrement la nuit. Durant le jour cette chaleur peut être stockée.

Parmi les paramètres à examiner, il y a :

- la puissance d'alimentation injectée qu'il faut garder constante durant les essais de laboratoire,
- le débit d'eau saline qui traverse continuellement les étages par les tuyaux de débordement.
- les niveaux de température de chaque unité du distillateur, d'où la différence de température entre les étages ?T.
- la capacité d'eau dans chaque étage,
- les surfaces d'évaporation et de condensation,
- l'angle d'inclinaison de la surface de condensation.
- les pertes thermiques à travers l'isolation et le dernier étage considéré comme cheminée.



- 1 Bassin inférieur alimenté en chaleur par une source externe (solaire ou autre)
- 2 + 4 Surface inclinée de condensation
- 3 + 5 Gouttière d'évacuation de l'eau distillée
- 6 Tube de remplissage d'eau saline pour tenir constant le niveau d'eau
- 7 Isolation sur les côtés
- 8 Points de mesure de la température

Fig. 4 : Principe de construction du distillateur à plusieurs étages et dimensions du prototype

3.2 Bilans énergétiques

Dans un distillateur à plusieurs étages, le processus de transport de chaleur et de matière s'effectue à travers les différents flux thermiques d'un étage à un autre.

1) Flux thermiques à partir du bassin inférieur

L'alimentation en chaleur $\dot{Q}_{a\ lim}$ du bassin inférieur provient d'une source de chaleur externe.

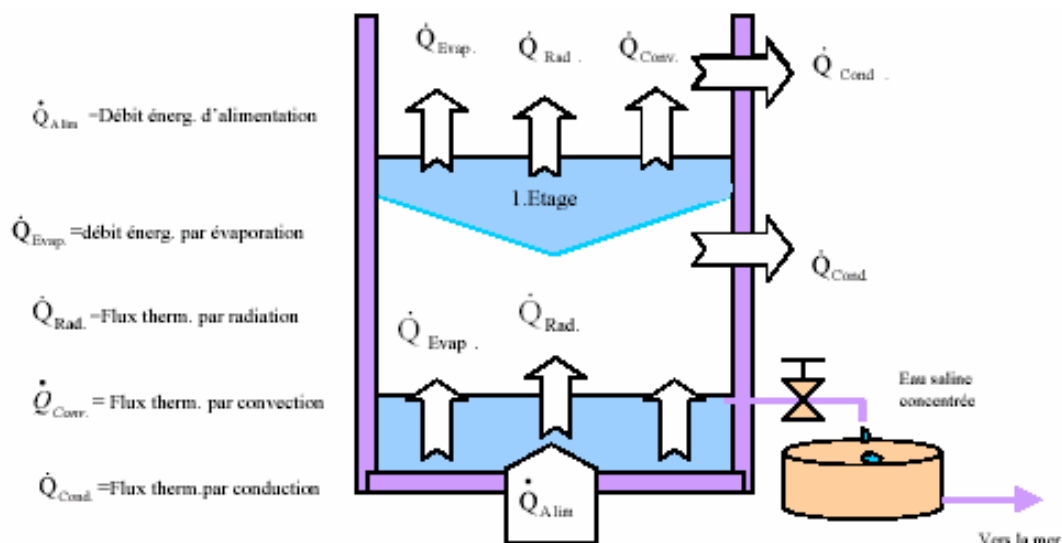


Fig. 5 : Flux thermiques à partir de l'étage inférieur (Echangeur de chaleur)

Equation de bilan des débits thermiques et de matière de l'étage inférieur.

$$\dot{Q}_{Alim} - C_{p,eau} \cdot m_{eau.éch.ch} \cdot \frac{dT_{eau.éch}}{dt} - (\dot{Q}_{Evap} + \dot{Q}_{Conv} + \dot{Q}_{Radi.}) - \dot{Q}_{cond} = 0$$

2) Flux thermiques entre deux étages

La source de chaleur du bassin **n** provient des différents flux thermiques du bassin **n-1**

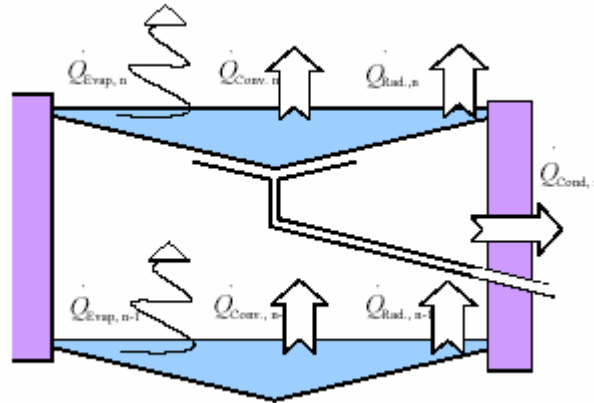


Fig. 6 : Flux thermiques entre deux étages quelconques d'un distillateur

Equation de bilan entre l'étage [n-1] et [n]

$$(\dot{Q}_{évap,n-1} + \dot{Q}_{conv,n-1} + \dot{Q}_{rad,n-1}) - [C_{p,eau} \cdot m_{ét,n} \cdot \frac{dT_{ét,n}}{dt} + (\dot{Q}_{évap,n} + \dot{Q}_{conv,n} + \dot{Q}_{rad,n}) + \dot{Q}_{cond,n}] = 0$$

3) Débits thermiques entre l'étage n et le dernier étage (nommé couvercle ou cheminée).

L'eau évaporée du dernier étage n'est pas récupérée, elle retombe de nouveau dans l'avant dernier bassin :

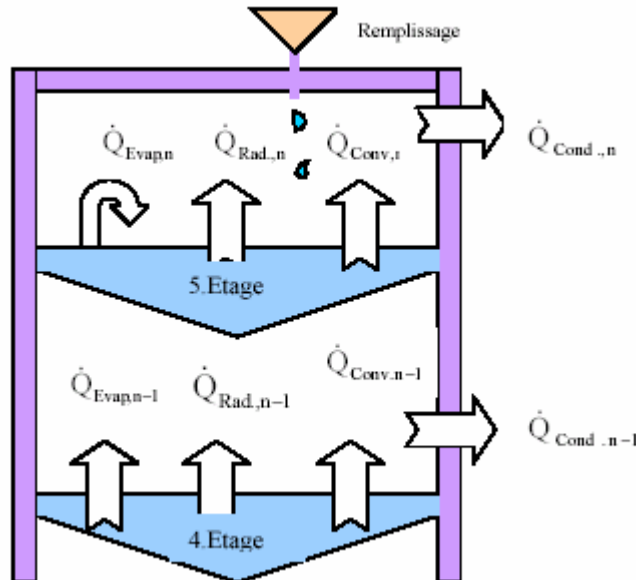


Fig. 7 : Flux thermiques à partir du dernier étage

L'Equation de bilan du dernier étage est :

$$(\dot{Q}_{évap,n-1} + \dot{Q}_{conv,n-1} + \dot{Q}_{rad,n-1}) - [C_{p,eau} \cdot m_{ét,n} \cdot \frac{dT_{ét,n}}{dt} + (\dot{Q}_{conv,n} + \dot{Q}_{rad,n}) + \dot{Q}_{cond,n}] = 0$$

3.3 Rendement

Le rendement caractérise le rapport entre le débit thermique par évaporation et le flux thermique utilisé. Pour calculer plus précisément le rendement d'un bassin, il faut le considérer en fonction du temps, puisque le système est dans un état transitoire. L'énergie injectée dans le bassin est utilisée aussi bien pour réchauffer l'eau que pour l'évaporer. La capacité thermique de chaque bassin doit donc être prise en considération dans l'évaluation du rendement.

3.3.1 Rendement du bassin inférieur

$$\eta_{\text{éch, ch}} = \frac{\dot{Q}_{\text{évap}}}{\dot{Q}_{\text{a lim}} - \dot{Q}_{\text{eau}}} = \frac{\dot{m}_{\text{cond}} \cdot h}{(P_{\text{inj}} \cdot \eta) - [m_{\text{eau, éch, ch}} \cdot c_{p, \text{eau}} \cdot \frac{\Delta T_{\text{éch, ch}}}{\Delta t}]}$$

$\dot{Q}_{\text{évap}}$ Débit thermique par évaporation [W]

Le débit thermique par évaporation est le produit du débit de masse par condensation \dot{m}_{cond} [kg/s] et de l'enthalpie d'évaporation h [J/kg]

3.3.2 Rendement de l'étage n

$$\eta_{\text{ét, n}} = \frac{\dot{m}_{\text{cond, n}} \cdot h}{(Q_{\text{évap, n-1}} + Q_{\text{conv, n-1}} + Q_{\text{rad, n-1}}) - [m_{\text{eau, n}} \cdot c_{p, \text{eau}} \cdot \frac{\Delta T_n}{\Delta t}]}$$

Résultats d'une série de mesures de laboratoire pour la production d'eau distillée en fonction de la température.

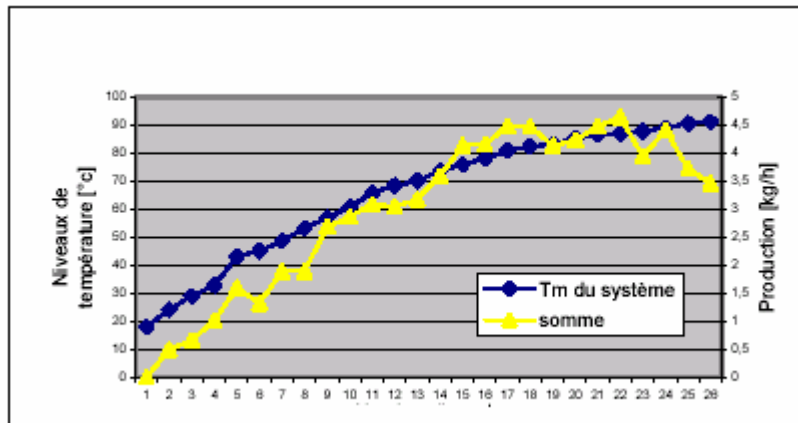


Fig. 8 : Production horaire d'eau distillée de tous les étages par intervalle de 10 min

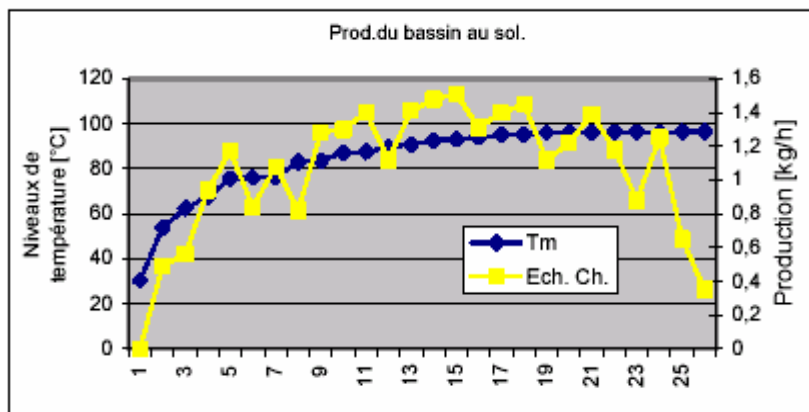


Fig. 9 : Production horaire d'eau distillée du bassin inférieur par intervalle de 10 min

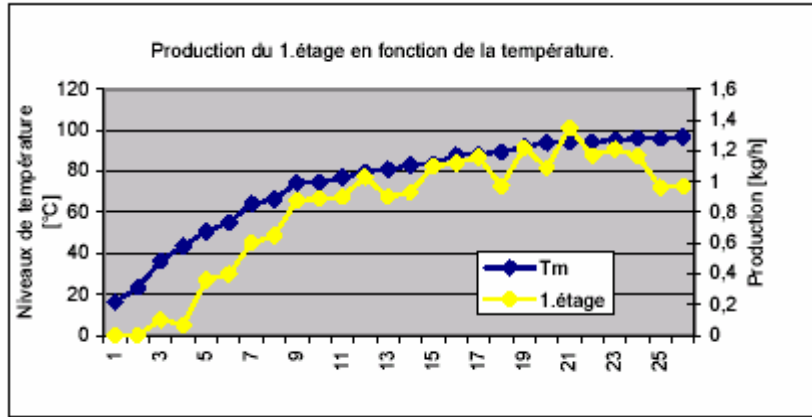


Fig. 10 : Production horaire d'eau distillée premier étage par intervalle de 10 min

3.3.3 Le coefficient COP :

Le facteur de récupération de chaleur COP (**Coefficient Of Performance**) est défini :

$$COP = \frac{m_{\text{prat.}}}{m_{\text{th.}}}$$

avec

$m_{\text{prat.}}$ = quantité d'eau évaporée réellement (en pratique) [kg]

$m_{\text{th.}}$ = quantité d'eau distillée théoriquement [kg]

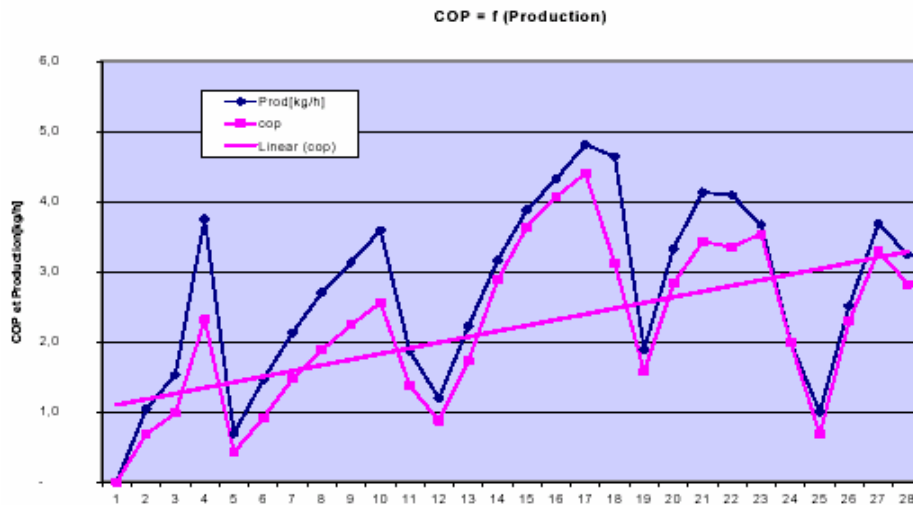


Fig. 11 : Evaluation du COP en fonction de la production

Aussi longtemps que le distillateur ne se trouve pas en équilibre thermique, les informations fournies par le COP, ne sont pas tout à fait exactes, puisqu'une partie de l'énergie injectée dans le système est utilisée pour réchauffer l'eau et l'enveloppe. Pour évaluer le rendement d'une installation par l'intermédiaire du COP, il faut donc, soustraire l'énergie capacitive de l'énergie injectée; ce qui se traduit par l'équation suivante:

$$COP = \frac{\dot{m}_{\text{cond},\Sigma} \cdot h}{Q_{\text{Alim}} - [(m_{\text{eau},\Sigma} \cdot c_{p,\text{eau}} + m_{\text{Acier},\Sigma} \cdot c_{p,\text{Acier}}) \cdot \frac{\Delta T_m}{\Delta t}]}$$

$\dot{m}_{\text{cond},\Sigma}$ = débit de masse de l'eau condensée de tous les étages

h = enthalpie correspondant à la température moyenne du distillateur

- La capacité thermique du système se compose de la capacité thermique de l'eau et de celle de l'enveloppe.
- La différence de température ΔT est obtenue conformément à chaque étage.

Le distillateur construit et utilisé a 5 étages: le COP peut donc avoir une valeur théorique maximale de 5. Cela signifie que la quantité d'énergie injectée dans le bassin inférieur est 5 fois récupérée et utilisée. Or, cette valeur ne peut être atteinte en pratique, car tout transfert d'énergie est lié à des pertes. Les diagrammes représentent les tracés du COP en corrélation avec la production d'eau distillée de toute l'installation.. Le coefficient de récupération de chaleur augmente en fonction de ce paramètre. Parfois, Le COP en fonction de la production en eau distillée de l'installation.

3.3.4 Rentabilité du système

Pour obtenir une appréciation sur le fonctionnement et le rendement d'un distillateur, il faut connaître, bien entendu, la quantité d'eau condensée, qui seule permet de déterminer le point optimal obtenu en utilisant les différents paramètres plusieurs fois énumérés dans ce travail. La figure 12 donne un aperçu sur les quantités d'eau condensée des différents étages en fonction de l'énergie électrique d'alimentation, durant une semaine. Les fluctuations sont dues à l'arrêt d'alimenter en énergie le distillateur durant la nuit.

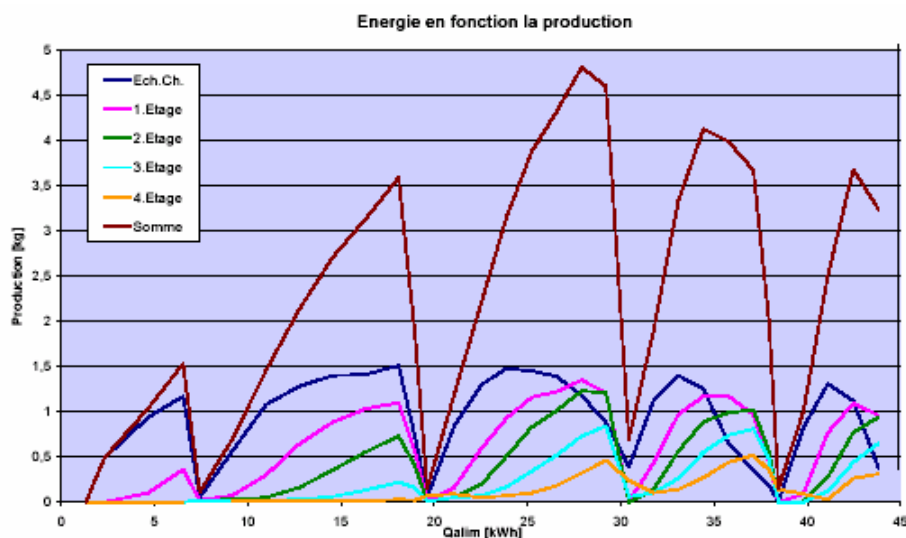


Fig. 12 : Production d'eau distillée en fonction de l'énergie injectée durant une semaine

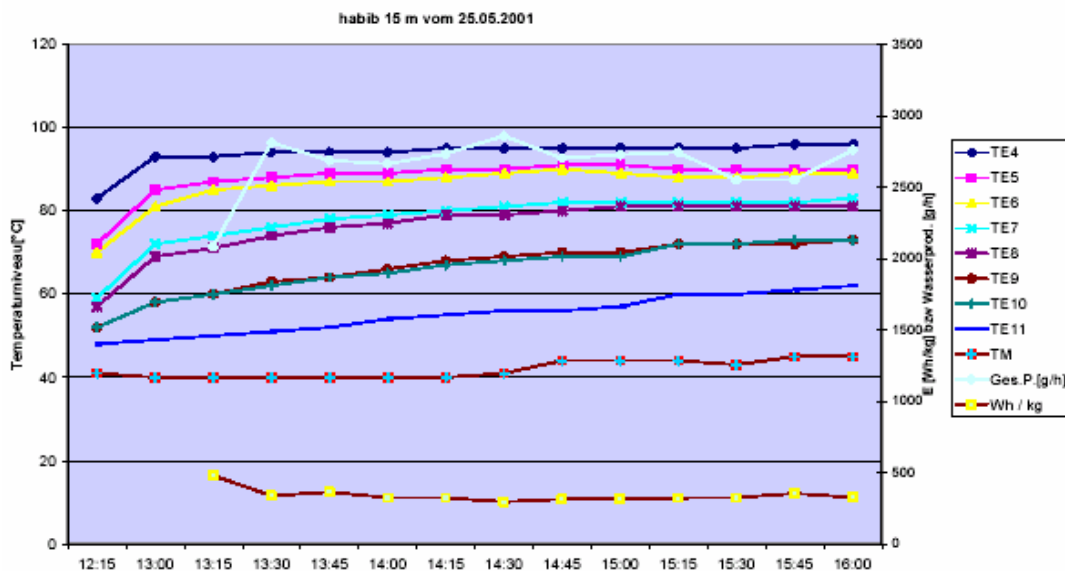


Fig. 13 :

4. ESSAIS ET EXPLOITATION DES DONNEES

- La température

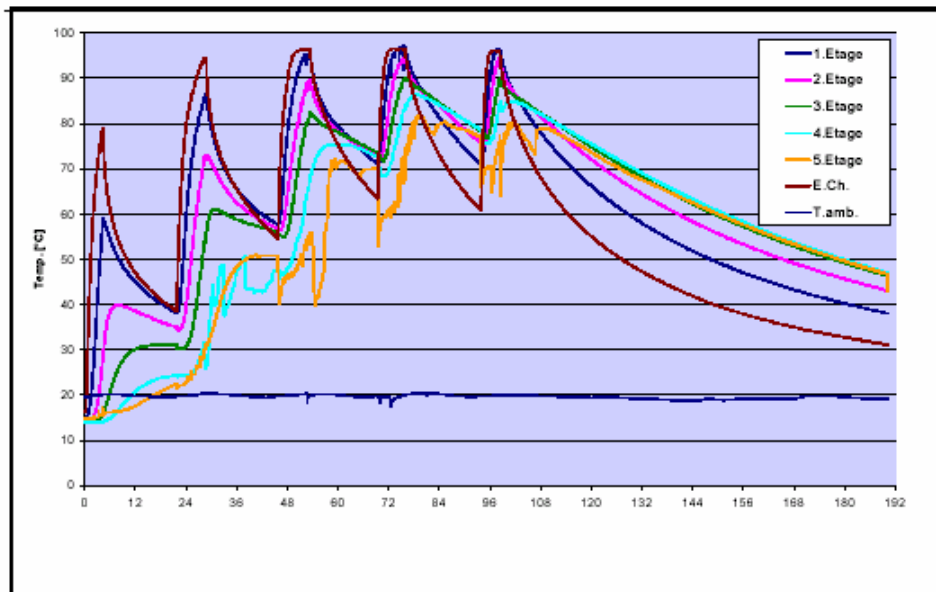


Fig. 14 : Courbes des différents niveaux de température durant une semaine dans un équilibre thermique transitoire

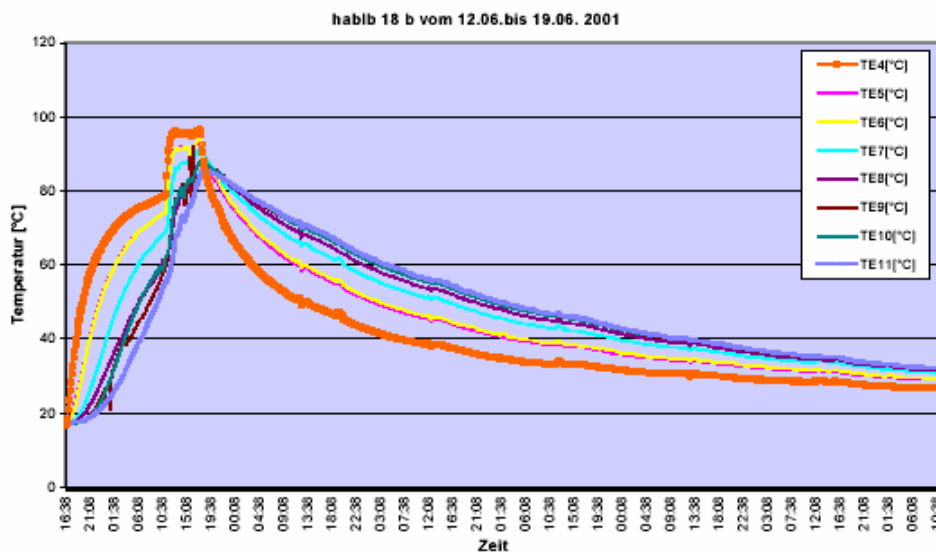


Fig. 15 : Courbes de refroidissement de tous les étages durant une semaine
Moyen de calculer la valeur de K

5. CONCLUSION

L'idée de ce projet consiste à réaliser à l'aide de moyens techniques simples et avec un minimum de know how, une alimentation modeste en eau potable.

Cette méthode de récupérer et d'utiliser plusieurs fois la même quantité d'énergie solaire captée a pour but de baisser sensiblement la consommation énergétique de manière à ce que l'énergie solaire devienne une alternative dans la technique du dessalement de l'eau.

Le système fonctionne à la pression atmosphérique pour éviter tous frais liés à l'augmentation de la pression.

c'est ainsi qu'une huile végétale a remplacé l'eau comme fluide caloporteur.

le circuit du fluide caloporteur s'effectue par thermosiphon.

Le système fournit un bon rendement lorsque

- l'étage inférieur atteint une température variant entre 96 et 98°C,

- la différence de température varie entre 6 et 10 K

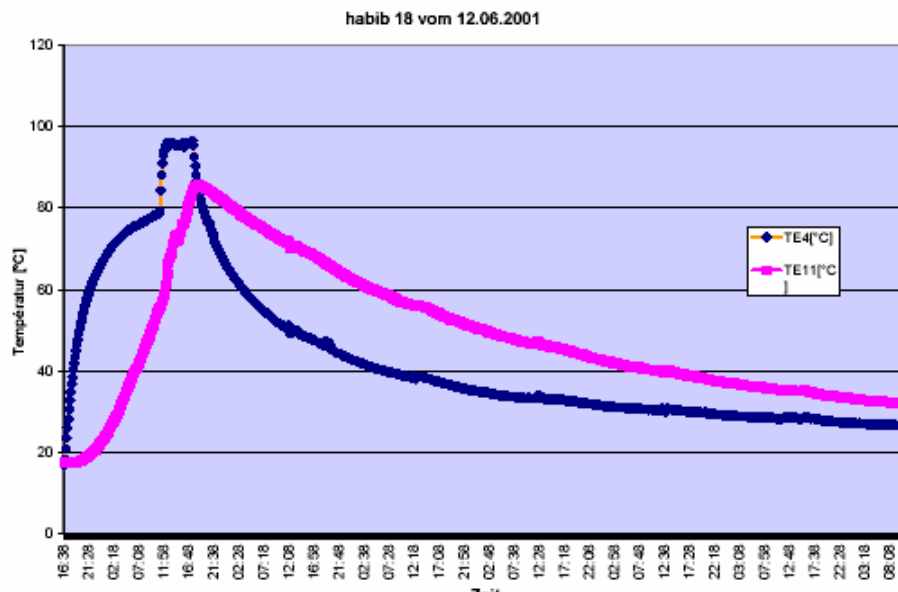


Fig. 16 : Courbes de refroidissement de l'étage inférieur (TE4) et du dernier étage (TE11)

Le débit d'eau distillée aux conditions énumérées:

- 4,0 kg / h soit une production journalière de 30 kg correspondant
- à une énergie d'alimentation de 10,25 kWh correspondant à une quantité d'énergie solaire captée par une surface apture d'environ 2m²
- Consommation d'énergie par kg d'eau distillée : 0,3 kWh / kg
- Aspects économiques : le prix revient d'un kg d'eau 0,03 € (coût du kWh électrique en Allemagne est de 0,1€)

Les mesures effectuées au laboratoire ont donné des résultats encourageants.

REFERENCE

- [1] M.A.S Malik, G.N. Tiwari et A. Kumar: *Solar Distillation* : Pergamon Press. Ltd 1982.
- [2] J. A. Duffie and W. Beckmann: *Solar Engineering of thermal Processes*. New York. Chichester : John Wiley and sons, 1991.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft, Verfahrenstechnik, Auflage, Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1997.
- [4] W. Wagner: *Wärmeübergang*, Grundlagen, 4. überarbeitete Auflage. Würzburg : Vogel, 1993.
- [5] K. Schwarzer : *Grundbegriffe der Thermodynamik*. Skript zur Vorlesung. FH-Aachen, 1993.
- [6] H. D. Beahr : *Thermodynamik*. Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 1993.
- [7] W. Krug: *Solaranlagentechnik* : Skript FH-Aachen : Abteilung Jülich 1994.
- [8] K. P. Dielmann : *Heat Transfer*, Aachen University of Sciences, Department Jülich in Order of Babcock, Sept/Oct 1999.
- [9] Gülck : *Zustands-und Stoffwerte Wasser-Dampf-Luft*, Verbrennungsrechnung, 2. Bearbeitete, Auflage. Berlin 1991. Verlag für Bauwesen GmbH.
- [10] N. Elsner : *Grundlage der technischen Thermodynamik* Band 1 Band Akademie Veerlag, Berlin 1993.

ANNEXE

1-Quelques formules se rapportant aux propriétés thermodynamiques de l'air humide

Débit de masse de l'air humide dans une convection libre.

$$\dot{m}_{\text{air}} = \frac{\dot{q}_{\text{conv}}}{C_{p, \text{air}}(T_0 - T_\infty)} = \frac{\alpha_{\text{conv}}}{C_{p, \text{air}}}$$

On suppose que l'air à la surface d'eau est saturé. Le contenu de vapeur d'eau par kg d'air sec :

$$x = \frac{M}{M_{\text{air}}} - \frac{P_0}{(P_1 - P)} = 0,622 \frac{P_0}{P_{\text{air}}} = \frac{m}{m} \quad m_{\text{vap}} = \frac{M}{M_{\text{air}}} - \frac{P_0}{(P_1 - P)} - \frac{\alpha}{C_{p, \text{air}}}$$

$$\dot{q}_{\text{vap}} = \dot{m}_{\text{vap}} \Delta h \quad \dot{q}_{\text{vap}} = \alpha_{\text{évap}} (P_{\text{vap},0} - P_{\text{vap},\infty})$$

On suppose que $P_{\text{vap},0}$ et $P_{\text{vap},\infty} \ll P_t$ (pression de l'ambiance)

d'où :

$$\alpha_{\text{évap}} = \frac{M_{\text{eau}}}{M_{\text{air}}} - \frac{\alpha_{\text{conv}}}{C_{p, \text{air}}} - \frac{1}{P} \quad \alpha_{\text{évap}} = 0,013 \alpha_{\text{conv}}$$

2-Définitions

- Humidité relative : Rapport entre la pression partielle et la pression de saturation correspondante (ou la densité)

$$\phi = \frac{P_{\text{vap}}}{P_{\text{vap},\text{sat}}} = \frac{\rho_{\text{vap}}}{\rho_{\text{vap},\text{sat}}}$$

ρ_{vap} : densité de la vapeur d'eau présente [kg/m³]

Degré de saturation ψ ? = $\frac{X}{X_s}$ X = contenu en vapeur d'eau absolu [kg/kg air sec]

X_s = valeur absolue en vapeur d'eau saturée [kg/kg air sec] $X = 0,622 \frac{P_{\text{vap}}}{P - P_{\text{vap}}}$

L'enthalpie de l'air humide ($X \ll X_t$) se compose de l'enthalpie de l'air sec et de l'enthalpie de la vapeur d'eau

$$h = C_{p, \text{air}} - 1 + X(r + C_{p, \text{vap}} - t)$$

$C_{p, \text{air}} = 1,001 \text{ kJ/(kg K)}$ capacité thermique spécifique de l'air sec. $r = 2500 \text{ kJ/kg}$ chaleur d'évaporation de l'eau à 0°

$C_{p, \text{vap}} = 1,86 \text{ kJ/(kg K)}$ capacité thermique spécifique de la vapeur d'eau surchauffée

Densité de l'air humide

$$\rho_{\text{air}, \text{sat}} = \frac{m_{\text{air}} + m_{\text{vap}}}{V} = \rho_{\text{air}} + \rho_{\text{vap}} = \frac{P_{\text{air}}}{R_{\text{air}} \cdot T} + \frac{P_{\text{vap}}}{R_{\text{vap}} \cdot T} \quad P_t = P_{\text{air}} + P_{\text{vap}, \text{sat}}$$

$$\rho_{\text{air}, \text{sat}} = \frac{P_t - P_{\text{vap}, \text{sat}}}{R_{\text{air}} \cdot T} + \frac{P_{\text{vap}, \text{sat}}}{R_{\text{vap}} \cdot T} \quad R_{\text{air}} = 287,06 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad R_{\text{vap}} = 461,5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\frac{R_{\text{air}}}{R_{\text{vap}}} = \frac{M_{\text{vap}}}{M_{\text{air}}} = 0,622 \quad \rho_{\text{air}, \text{sat}} = \left\langle 1 - 0,378 \cdot \frac{P_{\text{vap}}}{P_t} \right\rangle \cdot \frac{P_t}{R_{\text{air}} \cdot T}$$