

# Condensation de vapeur d'eau en milieu partiellement clos soumis à des conditions périodiques de température et d'humidité : simulation et influence des conditions opératoires.

Jean BATINA<sup>1\*</sup>, René PEYROUS<sup>2</sup>, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP), Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), BP 1155 – 64013 Pau, France.

<sup>2</sup> Ancien membre du Laboratoire d'Electronique des Gaz et des Plasmas, Université de Pau et des Pays de l'Adour - 64000 PAU, France.

\* (auteur correspondant : [jean.batina@univ-pau.fr](mailto:jean.batina@univ-pau.fr))

**Résumé** - Cette étude vise à déterminer les paramètres les plus significatifs et agissant, en milieu partiellement clos, sur les effets de condensation de vapeur d'eau présente dans l'air. La structure prise en exemple (0,25 m<sup>3</sup>) est soumise à des conditions atmosphériques extérieures (température et hygrométrie) qui génèrent dans cet espace, des mouvements convectifs et des variations thermiques. Ceux-ci conduisent localement, en volume et/ou sur les parois, à la condensation de l'eau présente dans l'air, initialement contenu ou introduit par renouvellement (orifice) dans le volume considéré. Selon les simulations numériques, les quantités d'eau condensée obtenues dépendent : 1) des dimensions de la structure (volume et parois), 2) du renouvellement de l'air (fonction des dimensions de l'orifice et de la convection interne) et de son hygrométrie propre, 3) du déphasage des conditions thermiques et hygrométriques.

## Nomenclature

$\vec{V} = (u, v)$	champ de vitesses, $m.s^{-1}$	D	diffusivité massique, $m^2.s^{-1}$
$g$	accélération de la pesanteur, $m.s^{-2}$	<i>Symboles grecs</i>	
$p$	pression, $Pa$	$\rho$	masse volumique, $kg.s^{-1}$
$T$	température, $K$	$\mu$	viscosité dynamique $Pa.s$
$t$	temps, $s$	$\lambda$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$c_p$	capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$		
$c$	concentration		

## 1. Introduction

De nombreux travaux tant expérimentaux que plus fondamentaux ont montré la faisabilité de condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air en vue de sa récupération [1,2,3]. Les succès restent mesurés et le thème sujet à controverses scientifiques [4]. La simulation numérique, de plus en plus présente dans les sciences de l'ingénieur, na été que très peu utilisée pour décrire, comprendre et expliquer ce processus complexe qui fait intervenir à la fois, et de façon fortement couplée, transfert de masse, de chaleur et thermodynamique des mélange [5,6]. L'objectif de cette étude consiste à déterminer les paramètres les plus significatifs agissant sur les effets de condensation de vapeur d'eau présente dans l'air et observés en milieu clos ou partiellement clos. Une illustration de tels phénomènes se retrouve par exemple dans le cas du sarcophage (non étanche) d'Arles-sur-Tech [7,8] où les parois sont constituées de marbre et dont les dimensions conduisent à un volume d'environ 0,25 m<sup>3</sup>. Cette structure est soumise à des conditions atmosphériques extérieures (température et hygrométrie) qui génèrent dans cet espace, des mouvements convectifs et des variations thermiques. Celles-ci sont alors susceptibles de créer

localement en volume et/ou sur les parois, la condensation de l'eau présente dans l'air initialement contenu dans le milieu, ou introduit par renouvellement.

Les détails de la modélisation sont traités dans une première partie. Les évolutions de température, d'hygrométrie et de quantité d'eau condensée qui en découlent, sont présentées dans une seconde partie pour différents instants de la journée. Enfin, outre l'étude de certains paramètres sur le comportement dynamique, la conclusion montre l'existence d'un maximum de condensation fonction du déphasage entre la température et l'humidité relative.

## 2. Modélisation

Dans le domaine parallélépipédique de dimensions internes : 0,47 m x 0,40 m x 1,76 m, nous considérons une coupe transversale (0,47 m x 0,40 m) de la figure 1, selon laquelle s'effectuent les mouvements convectifs. Les parois sont en marbre. Les faces 1 et 2 subissent des conditions de température (air extérieur) variant sinusoïdalement dans le temps, tandis que les parois 3 et 4 sont supposées adiabatiques (conditions de flux thermique nul). L'air humide contenu dans l'enceinte est donc soumis à un phénomène de convection naturelle et son renouvellement se fait au moyen de l'orifice situé en partie haute et à droite de la coupe transversale (figure 1). La pression atmosphérique, l'humidité relative et les températures mises en jeu sont issues des valeurs moyennes provenant des résultats expérimentaux obtenus par Perard et Leborgne [8]. De plus, les écarts de température sont suffisamment faibles pour justifier l'approximation de Boussinesq.

Dans ces conditions, le système d'équations à résoudre comprend la conservation de la quantité de mouvement et de continuité (Navier-Stokes) ainsi que la conservation de l'énergie. Les formes vectorielles classiques de ces équations sont les suivantes :

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \left( \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \right) \vec{V} \right] = -\vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla} \cdot \left( \nabla \vec{V} + \nabla^t \vec{V} \right) + \rho \vec{g} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

$$\rho c_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T \right] = \lambda \Delta T + S \quad (3)$$

A ces équations de la dynamique et de la thermique, il faut ajouter l'équation de transport de la vapeur d'eau donnée par :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} c = \vec{\nabla} \cdot \left( D \vec{\nabla} c \right) + S' \quad (4)$$

où S et S' représentent respectivement les termes sources (thermique pour l'équation 3 et massique pour l'équation 4) liés à l'évaporation et à la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air.

Les équations d'état de l'air humide permettent de relier température sèche, humidité relative avec les autres variables caractéristiques de cet air: humidité absolue (ou spécifique) et température de rosée notamment.

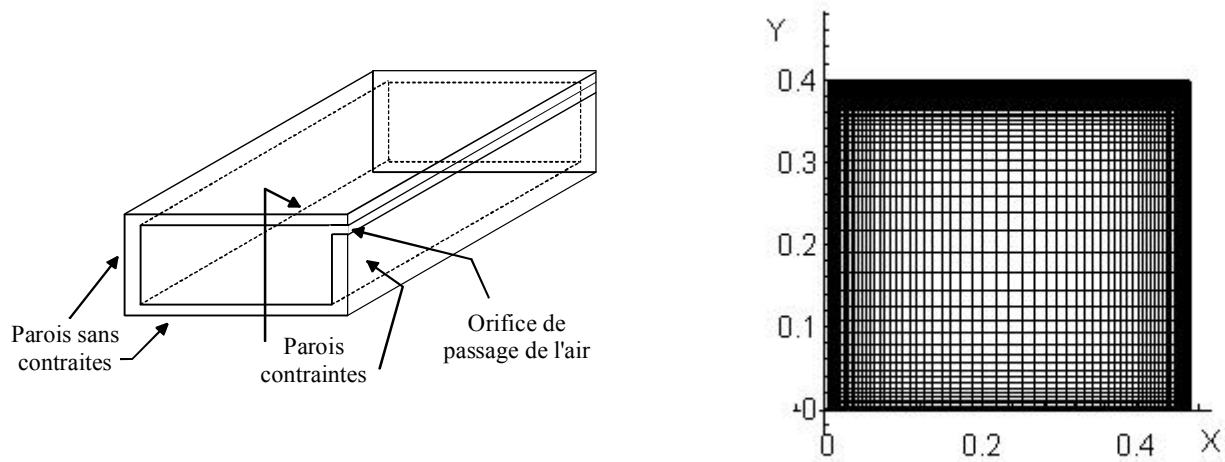


Figure 1 : Coupe transversale, conditions aux limites et détail du maillage du milieu étudié

Partant d'une configuration définie, des variations sinusoïdales de température ( $T=15\pm 5^{\circ}\text{C}$ ),  $+15^{\circ}\text{C}$  à 6h du matin, maximale à 12h et minimale à 24h et des variations en créneau de l'hygrométrie relative (HR = 60% pendant 10h, HR = 90% pendant 14h) sont imposées (cf. figure 2). Les conditions thermiques et hygrométriques de l'air extérieur varient dans le temps, avec une période de 24h. A l'instant  $t=0$  (6h du matin), on suppose que le fluide, à l'intérieur du volume considéré, est au repos avec une humidité relative et une température uniformes. La contrainte thermique est appliquée sur 2 faces extérieures adjacentes, les 2 autres faces étant laissées adiabatiques.

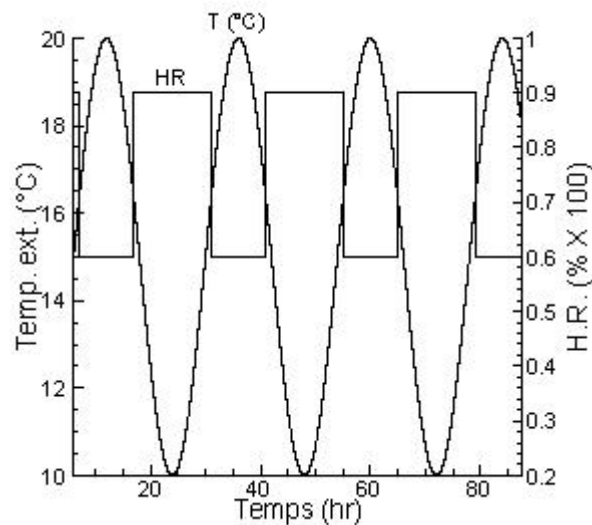


Figure 2 : Evolutions de la température et de l'humidité relative de l'air extérieur imposées comme conditions aux limites du modèle sur les parois contraintes.

La modélisation des processus est bidimensionnelle, c'est-à-dire selon une coupe transversale et le maillage est de type structuré. Il est fortement raffiné dans le sillage de l'orifice et au voisinage des parois, comme on peut le constater sur la figure 1. Il comprend au total 5940 (66 par 90) mailles.

Les équations sont résolues par la méthode des volumes finis au moyen du logiciel Aquilon®, développé en particulier par Caltagirone [9], avec un schéma en temps de Gear d'ordre 2, dont le pas de temps est fixé à 5 s. En partant de ces conditions initiales stables, on montre que le

système atteint un régime stationnaire (plus de variation pour la même heure d'un jour à l'autre) au bout de 3 jours (voir figures 5).

### 3. Résultats

Compte tenu de l'étendu du champ d'investigation, la simulation numérique permet de prendre en considération le grand nombre de paramètres que l'on peut faire varier. Cependant, nous avons choisi de ne montrer que les résultats les plus significatifs dans la configuration figée et décrite précédemment.

Le comportement sur les coupes bidimensionnelles des champs de température et d'hygrométrie (en terme d'humidité spécifique) locales est représenté dans les figures 3 et 4. Les isothermes (figures 3) montrent une activité convective, bien que naturelle, assez importante et illustrée par des gradients de température avoisinant  $5^{\circ}\text{C}$  dans certains cas. Ce comportement met en évidence les déphasages dus à la présence des parois de marbre qui présentent beaucoup plus d'inertie thermique que l'air intérieur de l'enceinte.

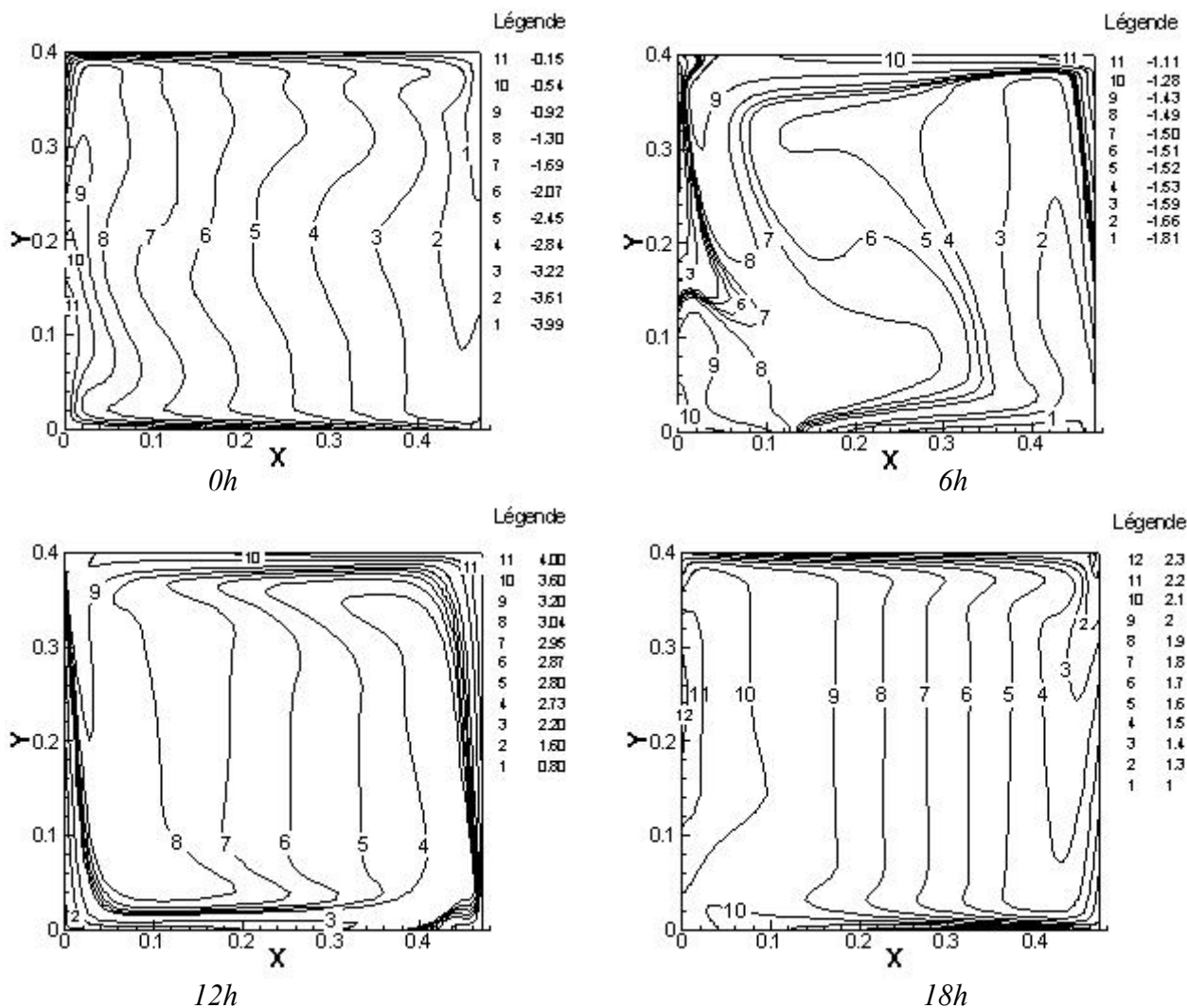


Figure 3 : Evolutions des isothermes (en valeur d'écart par rapport à la moyenne de  $15^{\circ}\text{C}$ ) à l'intérieur du système à différents instants.

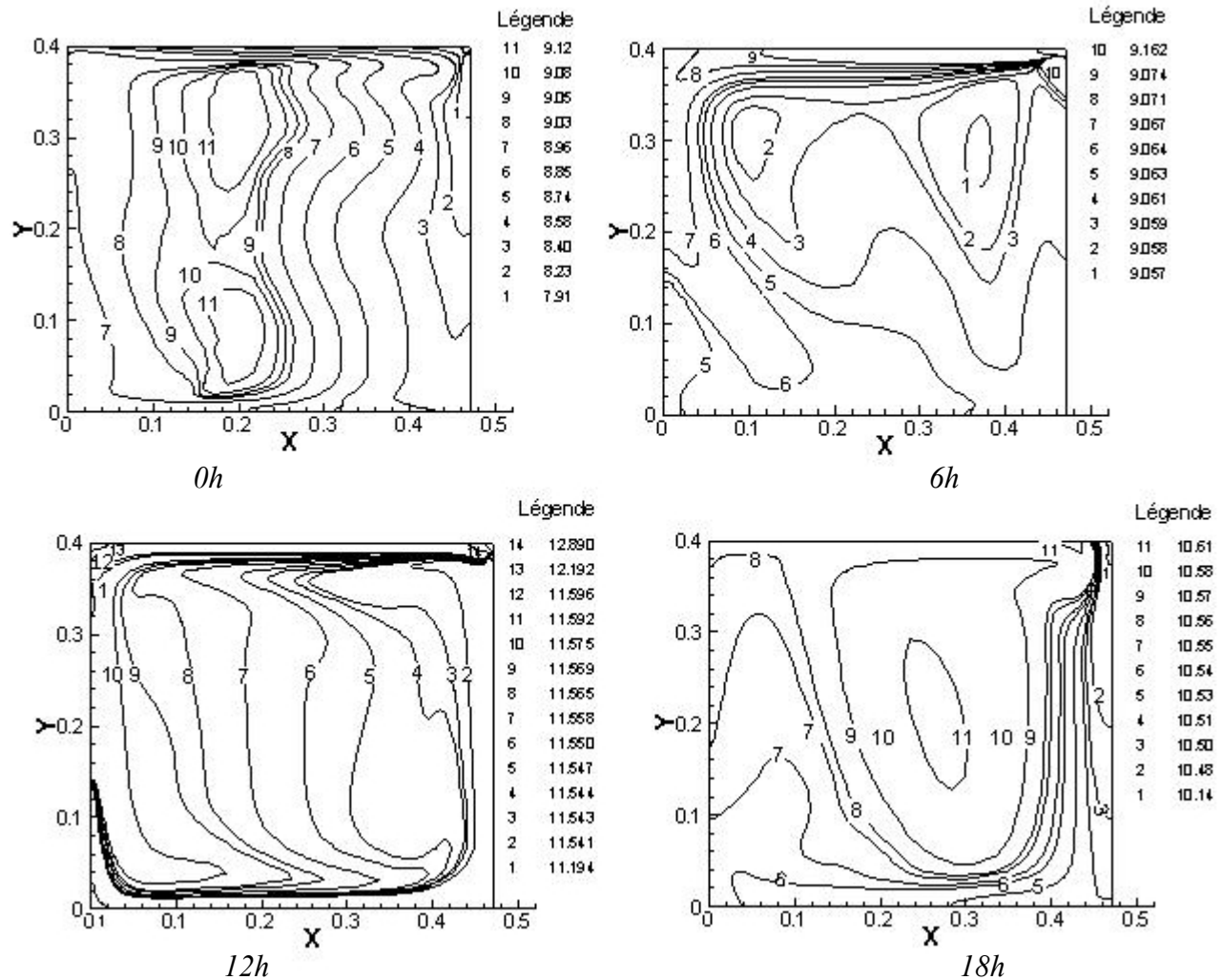
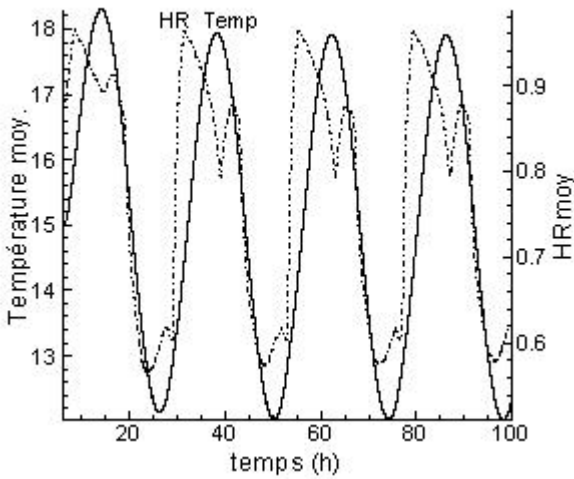


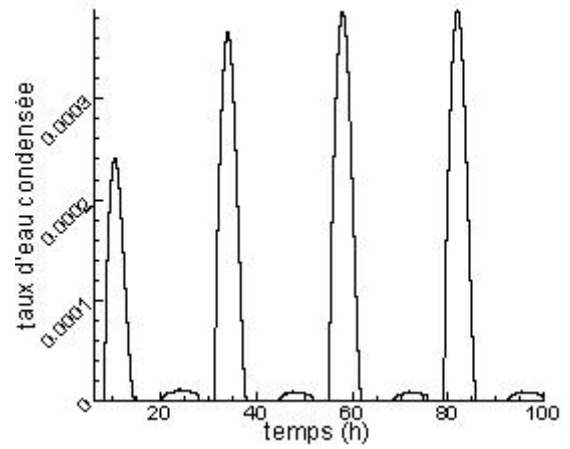
Figure 4 : Evolutions des humidités absolues (g/kg d'air sec) à l'intérieur du système à différents instants.

Concernant les iso humidités spécifiques (figures 4), on observe une concentration de l'humidité relativement élevée au voisinage de l'orifice et des parois soumises aux contraintes. La répartition de l'hygrométrie en dehors de ces zones reste relativement homogène. Il semble que le phénomène de diffusion de la vapeur d'eau au sein de la cavité ait une cinétique plus importante que celle de convection et participe plus activement à l'homogénéisation de l'humidité.

Les courbes précédentes permettent une vue locale et à tout instant du comportement dynamique massique et thermique du cas étudié. Néanmoins une vue globale de ce comportement (par intégration numérique des variables dans l'espace) illustre mieux les phénomènes d'évaporation/condensation qui ont lieu dans l'enceinte. Ainsi, et partant de conditions aux limites synchrones (coïncidence entre maxima et minima de température et d'hygrométrie  $s$ , figure 2), on voit sur la figure 5a qu'en valeurs moyennes, les températures et hygrométries suivent un comportement similaire à celui de l'extérieur de l'enceinte. On note toutefois un déphasage d'environ 2 heures entre la température et l'hygrométrie relative.



(a)



(b)

Figure 5 : Evolutions de la température moyenne et de l'humidité relative moyenne de l'air intérieur (a) ainsi que de la quantité moyenne d'eau condensée dans l'enceinte (b).

La figure 5b montre les conséquences de ces évolutions au travers des quantités d'eau cumulées au cours du temps sur trois jours (rapport entre la quantité d'eau condensée et la quantité d'eau contenue dans l'air à l'instant initial). Quoique relativement faible, le phénomène de condensation n'est cependant pas négligeable, et sa variation temporelle laisse apparaître un début de condensation à 7h, un maximum aux alentours de 0h et une fin du phénomène (passage de condensation à évaporation) à 15h. Cette première phase de condensation correspond à un apport d'eau par renouvellement, c'est-à-dire aux échanges hygrométriques entre l'extérieur et l'intérieur de l'enceinte. On doit noter une seconde phase de condensation qui débute à 19h et se termine à 29h (5h du matin), avec un maximum aux alentours de 1h30 le jour suivant. Cette seconde phase, beaucoup moins importante que la première, correspond à la baisse de température interne. Ces figures démontrent de manière saisissante l'importance des échanges thermiques et surtout hygrométriques avec le milieu extérieur par rapport au phénomène purement convectif à l'intérieur de l'enceinte.

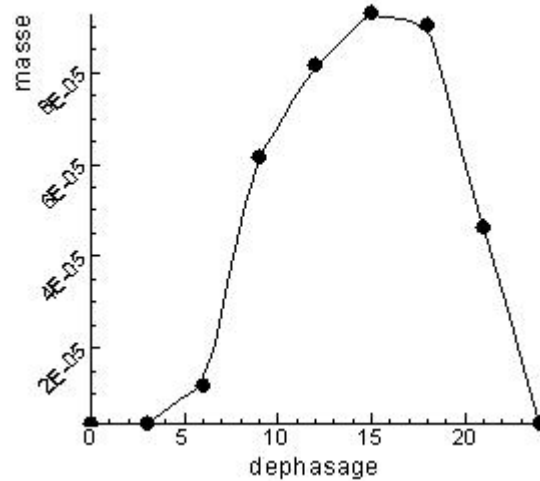


Figure 6 : Evolution de la quantité maximale condensée en fonction du déphasage entre température et humidité relative extérieure.

#### 4. Conclusion/Perspectives

Nous avons étudié l'influence sur les quantités d'eau condensées des paramètres tels que les conditions aux limites thermiques et hygrométriques, le déphasage température - hygrométrie, les dimensions de l'orifice, le temps de résidence de la vapeur d'eau à l'intérieur de l'enceinte (coupes transversales ou longitudinales), etc. Cette étude paramétrique montre une dépendance importante de la quantité condensée par rapport aux variations de ces paramètres. Leur nombre

élevé ne permet pas a priori de déterminer pour l'instant un optimum. Nous avons cependant constaté que les paramètres les plus significatifs sont le déphasage température - hygrométrie et le temps de résidence.

On peut voir sur la figure 6 que la quantité d'eau condensée, en fonction du déphasage entre température et hygrométrie les autres paramètres étant figés (coupe et dimensions de trou), passe par un maximum obtenu pour un déphasage de l'ordre de 15h.

Les simulations en cours avec d'autres conditions de coupe (longitudinale) et de dimensions de trou montrent également l'existence de maxima dépendant des conditions fixées. L'étude systématique de l'influence de tous ces facteurs et les quelques résultats obtenus ouvrent des perspectives prometteuses susceptibles d'améliorer le phénomène de condensation dans ce type de géométrie. A terme, les possibilités d'utilisation du modèle sont nombreuses et les résultats peuvent concerner tout autant les systèmes de récupération d'eau que les lieux partiellement clos où peut régner une forte humidité (caves d'affinage, champignonnières,...) afin de mieux cerner le comportement et éventuellement proposer des voies d'améliorations.

## Références

- [1] V.S. Nikolayev, D. Beysens, A. Gioda, I. Milimouk, E. Katiushin, J.-P. Morel. Water recovery from dew. *Journal of Hydrology* 182 (1996) 19-35.
- [2] M. Muselli, D. Beysens, J. Marcillat, I. Milimouk, T. Nilsson, A. Louche. Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica Island, France). *Atmospheric Research* 64(2002)297-312.
- [3] W.E. Alnaser, A. Barakat. Use of condensed water vapour from the atmosphere for irrigation in Bahrain. *Applied Energy* 65 (2000) 3-18.
- [4] D. Beysens, I. Milimouk, V.S. Nikolayev, S. Berkowicz, M. Muselli, B. Heusinkveld, A.F.G. Jacobs. Comment on "The moisture from the air as water resource in arid region: Hopes, doubt and facts" by Kogan and Trahtman. *Journal of Arid Environments* 67 (2006) 343-352
- [5] P. Gandhidasan, H.I. Abualhamayel. Modeling and testing of a dew collection System. *Desalination* 180(2005)47-51
- [6] D. Beysens, M. Muselli, V. Nikolayev, R. Narhe, I. Milimouk. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas. *Atmospheric Research* 73 (2005) 1- 22
- [7] D. Beysens, M. Muselli, J.-P. Ferrari, A. Junca. Water production in an ancient sarcophagus at Arles-sur-Tech (France). *Atmospheric Research* 57, (2001) 201-212.
- [8] G. Perard, C. Leborgne. Sarcophage d'Arles-sur-Tech, rapport technique. *Houille Blanche* 6, (1961), 873-881.
- [9] J.-P. Caltagirone and J. Breil Sur une méthode de projection vectorielle pour la résolution des équations de Navier-Stokes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Séries IIB - Mechanics-Physics-Astronomy, Volume 327, Issue 11, October 1999, Pages 1179-1184*