

MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN EVAPORATEUR SOLAIRE

Romain FILLET¹, Vincent NICOLAS*¹, Alain CELZARD¹, Vanessa FIERRO¹

¹ Université de Lorraine, CNRS, IJL, F-88000 Epinal, France

*(auteur correspondant : vincent.nicolas@univ-lorraine.fr)

Résumé

Un évaporateur solaire utilisant une mousse de tannin pour concentrer le rayonnement solaire a été modélisé en éléments finis avec le logiciel COMSOL Multiphysics. Une modélisation 2D axisymétrique a permis d'évaluer l'effet de la température et de l'humidité de l'air ambiant, ainsi que l'effet de l'ensoleillement sur une journée type et l'épaisseur d'isolation autour du système. Il en résulte que la température a une influence significative sur la performance, augmentation de 50% entre 20 et 40°C, et une épaisseur d'isolant de 3 cm est suffisante pour garantir la performance maximale de notre évaporateur à l'échelle laboratoire.

Nomenclature

a_w	activité de l'eau	T	Température, K
c_p	capacité thermique, J.K ⁻¹ .kg ⁻¹	<i>Symboles grecs</i>	
C_{opt}	concentration optique, sun	ε	fraction
D	coefficient de diffusion à l'intérieur du matériau, m ² .s ⁻¹	λ	conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹
E	émissivité du matériau et du côté du béccher	φ	porosité
h_c	coefficient d'échange convectif thermique, W.m ⁻² .k ⁻¹	ρ	densité, kg.m ⁻³
h_v	enthalpie de vaporisation, kJ.kg ⁻¹	η	efficacité
H_r	humidité relative, %	σ	constante de Stefan-Boltzmann
k_m	coefficient de transfert massique convectif, m.s ⁻¹	<i>Indices et exposants</i>	
\dot{m}	taux d'évaporation, kg.m ⁻² .h ⁻¹	a	ambiant
M	masse molaire, kg.mol ⁻¹	b	dessous
P	pression, Pa	i	composant i
$P_{s,0}$	ensoleillement moyen sur terre, W.m ⁻²	m	matériau
		s	côté
		sat	saturation
		v	vaporisation
		w	eau
		0	référence

1. Introduction

En raison du réchauffement climatique, de l'accroissement de la population mondiale et de la pollution des cours d'eau, les ressources en eau potable seront de plus en plus rares dans les années futures. D'ici 2050, 3,9 milliards de personnes, ou plus de 40% de la population mondiale, vont vivre dans des régions touchées par la sécheresse [1]. Pour résoudre ce problème, outre la diminution de la consommation, plusieurs approches complémentaires pourraient être développées, notamment le stockage et/ou la récupération et purification d'eaux impropres à la consommation.

Une des stratégies pour la purification des eaux est l'évaporation directe par un système d'évaporation passive, utilisant l'énergie solaire pour valoriser l'eau salée et/ou polluée. En effet, certains matériaux dits photothermiques, une fois placés à la surface de l'eau, ont la capacité d'absorber l'énergie solaire et d'accélérer l'évaporation, transformant ainsi entre 80% et 90% du

rayonnement solaire reçu en chaleur. La chaleur concentrée à la surface, mouillée par diffusion de l'eau liquide à travers le matériau, fait augmenter sa température, ce qui augmente la pression de vapeur et accroît le flux d'évaporation. La vapeur est ensuite condensée pour produire de l'eau purifiée [2]. Les systèmes d'évaporation de l'eau (SEE) sont le sujet de beaucoup de recherches et une grande quantité de matériaux ont été développés [3]. Un système d'évaporation de l'eau consiste en un matériau, qui fait office d'évaporateur, avec une surface qui présente une bonne absorption des radiations lumineuses pour maximiser l'utilisation de l'énergie entrante. Le transport de l'eau vers la surface d'évaporation est généralement garanti par le matériau qui est en contact direct avec le volume d'eau ou par l'utilisation d'une mousse additionnelle, de tiges de coton ou d'autres matériaux de transport [4]. Dans ce cas, le matériau est placé sur une mousse isolante pour lui permettre de flotter.

Pour comprendre les phénomènes mis en jeu et optimiser le système, un modèle axisymétrique à deux dimensions d'un évaporateur à base de mousse de tannin a été réalisé. Un précédent travail sur les conditions de mesure expérimentale a déjà été publié [5]. Celui-ci recommande des conditions de température de l'air de 25°C et d'humidité relative de 60%. Le modèle développé ici va permettre l'évaluation de l'impact de ces paramètres sur les résultats. Bien que des simulations numériques aient déjà été utilisées par le passé, elles se contentaient de vérifier le comportement de certains aspects, comme la distribution de la température, la diffusion de l'eau ou la géométrie. Dans ce manuscrit, la validation du modèle vis-à-vis des résultats expérimentaux sera présentée premièrement et, dans un second temps, une étude paramétrique sur les conditions aux limites sera réalisée. Enfin, une étude dynamique sera proposée, montrant l'évolution des performances sur une journée type.

2. Matériels et méthodes

2.1. Matériau d'évaporation

Le tannin utilisé pour produire la mousse est extrait de l'écorce de mimosa (*Acacia Mearnsii*), en utilisant un procédé industriel décrit dans la littérature. La mousse a été produite comme décrit dans des études précédentes [6,7] et a été découpée à la taille du bécher utilisé (58 mm de diamètre et 15 mm d'épaisseur), visible sur la Figure 1a.

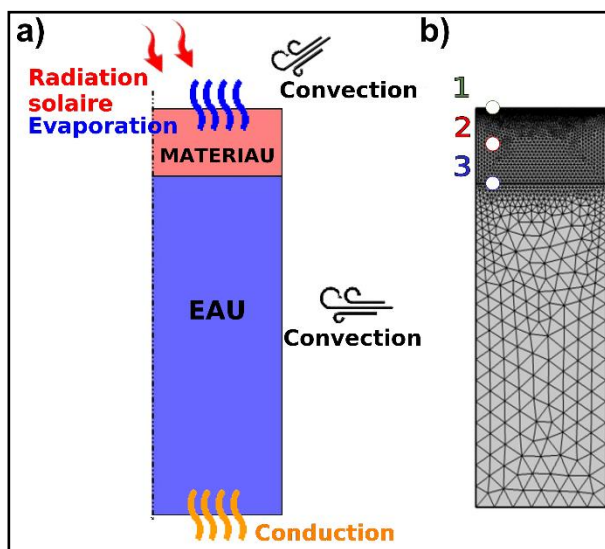


Figure 1. a) Géométrie axisymétrique et phénomènes aux frontières et b) maillage utilisé et points de mesures

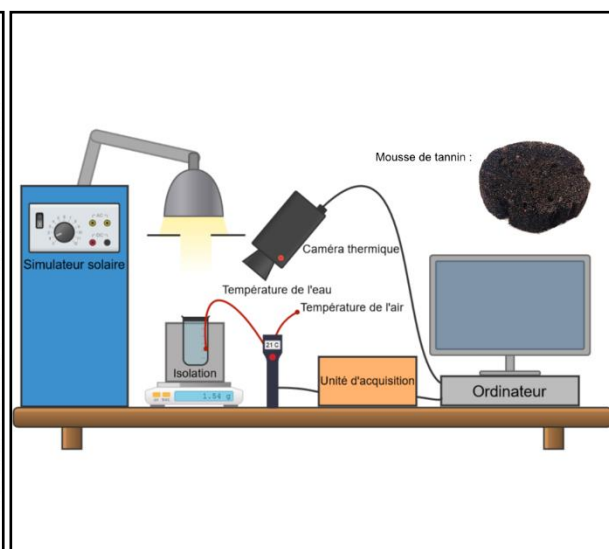


Figure 2. Montage expérimental et photo de la mousse de tannin (en haut à droite)

2.2. Protocole expérimental

Les mesures expérimentales sont réalisées en utilisant un simulateur de lumière solaire (SOLAR LIGHT LS-1000) pour ensoleiller un bécher rempli d'eau du robinet (60 mm de diamètre). Une mousse biosourcée à base de tannin est placée à la surface de l'eau (Figure 2), avec plusieurs thermocouples pour mesurer la température en plusieurs points (Figure 1b). Cette mousse a été choisie car elle est développée depuis plusieurs années au laboratoire avec des propriétés maîtrisées. Le bécher est placé sur une balance Sartorius ENTRIS, précise au milligramme pour mesurer les variations de masse totale du système, et donc le taux d'évaporation. En outre, une caméra thermique (OPTRIS PI) orientée vers la surface d'évaporation est utilisée pour mesurer la température. La température et l'humidité ambiante de l'air sont mesurées à l'aide d'un capteur placé dans la pièce. Le simulateur solaire est d'abord calibré pour fournir 1 kW.m^{-2} (aussi nommé 1 sun). Ensuite, le bécher, ainsi que l'eau, le matériau et les thermocouples sont placés sur la balance pour mesurer l'évolution de la masse de l'eau au cours du temps (Figure 4) afin de calculer le taux d'évaporation (en $\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$).

Afin de comparer l'expérience au modèle numérique, trois ensoleillements différents ont été fixés à 3300 secondes d'écart chacun. L'évolution de la température et de la perte de masse a pu être mesurée selon les variations de l'ensoleillement. L'efficacité globale du système est calculée en utilisant l'équation (1):

$$\eta = \frac{\dot{m}h_v}{C_{opt}P_{s,0}} \quad (1)$$

Dans la littérature, un résultat type est couplé à un résultat d'efficacité pour un ensoleillement donné. Théoriquement, une efficacité de 100%, pour une enthalpie de vaporisation de l'eau de 2450 kJ.kg^{-1} (à température et pression standard), donne un taux d'évaporation \dot{m} de $1.47 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ pour 1 sun d'ensoleillement. Cela représente le taux d'évaporation limite pour ces conditions, en considérant le matériau comme parfait. En revanche, il faut noter que cela ne prend pas en compte les échanges thermiques avec l'extérieur.

2.3. Modèle physique et numérique

Un modèle 2D axisymétrique a été réalisé en utilisant le logiciel COMSOL 5.6. Le matériau et le volume d'eau sont représentés par des rectangles (respectivement rouge et bleu sur la Figure 1a). Les conditions aux limites comprennent : à la surface, de l'ensoleillement solaire, de la convection avec l'air et l'évaporation de l'eau ; sur le côté, de la convection avec l'air et ; en dessous, de la conduction.

Les transferts de masse et les transferts thermiques durant l'évaporation ont été simulés par le biais de deux variables, la température, T , et la fraction volumique de liquide dans les pores, ε_l , obtenue par les équations de conservation de l'énergie et de la masse respectivement (Equation(2) et Equation (3)). L'énergie associée aux transferts de masse est négligée, du fait du caractère lent de la cinétique en jeu.

$$\rho_i c_{p,i} \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (-\lambda_i \vec{\nabla} T) = 0 \quad (2)$$

Le transfert de masse est représenté par un phénomène de diffusion de l'eau dans un matériau. Pour permettre au matériau de sécher et ainsi réduire l'évaporation à la surface lorsqu'elle n'est plus saturée en eau, une équation de diffusion de l'eau en régime transitoire est utilisée (Equation (3)) avec comme variable la fraction volumique d'eau liquide dans la structure

poreuse ε_l . L'équation (3) est obtenue à partir de l'équation de conservation de l'eau à l'intérieur du matériau [8].

$$\rho_w \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (-\rho_w D \vec{\nabla} \varepsilon_l) = 0 \quad (3)$$

À la surface (Equation (4)), l'échange thermique prend en compte la convection de l'air, la radiation solaire et les pertes par évaporation. Ces dernières se calculent en multipliant l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau (correspondant à l'enthalpie de vaporisation de l'eau, h_v , en $J.kg^{-1}$) par le taux d'évaporation, \dot{m} , en $kg.m^{-2}.h^{-1}$.

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda_m \vec{\nabla} T) = h_c(T_a - T) + \dot{m}(h_v + c_{p,w}(T_{w,i} - T)) + C_{opt} P_{s,0} + E_m \sigma (T_a^4 - T^4) \quad (4)$$

avec $-\vec{n}$ le vecteur unitaire normal à la limite considérée.

Sur la surface supérieure, l'évaporation de l'eau, \dot{m} , est déduit de la différence à la surface entre la concentration massique de l'eau et de l'air et est calculé de la façon suivante [9]:

$$-\vec{n} \cdot (-\rho_w D \vec{\nabla} \varepsilon_l) = \dot{m} = -k_m \frac{M}{R} \left(\frac{P_w^{v,sat}}{T} a_w - H_R \frac{P_a^{v,sat}}{T_a} \right) \quad (5)$$

avec k_m ($m.s^{-1}$) le coefficient de transfert convectif massique, calculé par l'analogie de Colburn [10]:

$$k_m = \frac{h_c}{1000} \quad (6)$$

En outre, $P_w^{v,sat}$ et $P_a^{v,sat}$ sont calculés à partir de l'équation de Clapeyron:

$$P_x^{v,sat} = P_0 \exp \left(\frac{h_v}{R} M \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (7)$$

L'échange thermique entre l'air et le côté du béccher s'effectue par convection et par radiation :

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda_i \vec{\nabla} T) = h_{c,s}(T_a - T) + E_s \sigma (T_a^4 - T^4) \quad (8)$$

Un seul type de transfert de chaleur par convection s'effectue à l'interface entre la balance et le fond du béccher :

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda_w \vec{\nabla} T) = h_{c,b}(T_a - T) \quad (9)$$

Le matériau est considéré saturé à l'interface entre l'eau et le matériau, ce qui fixe la valeur de la fraction volumique de liquide à la valeur de porosité du matériau. En outre, la continuité thermique est supposée.

$$\varepsilon_l = \varphi \quad (10)$$

Les variables T et ε_l sont calculées avec le logiciel commercial COMSOL Multiphysics 5.6, en utilisant un maillage de 4145 éléments triangulaires (Figure 1b). Le reste du maillage est généré automatiquement par le logiciel en fonction de la physique calculée à l'exception de la surface d'évaporation qui a été fixée à 100 éléments pour stabiliser la solution. Les calculs sont faits en

1 minute avec un ordinateur doté d'un processeur Xeon E5 quatre cœurs, couplé à 64 Go de RAM.

3. Résultats et discussion

3.1. Validation du modèle

Pour valider le modèle, des expériences ont été réalisées et les conditions ambiantes de ces expériences ont ensuite été introduites comme paramètres dans la simulation (T_a et H_r). Ainsi, le modèle a pu être validé en comparant ses résultats à ceux de l'expérience avec les paramètres d'entrée qui évoluent. La Figure 3 montre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux, ainsi la valeur absolue de l'écart entre les températures simulées et mesurées ($\Delta T = \text{abs}(T_{\text{exp}} - T_{\text{sim}})$), mesurés en trois points différents (visible sur la Figure 1b) : à l'interface entre l'eau et le matériau (1), au milieu du matériau (2) et à l'interface entre l'air et le matériau (3). La Figure 4 montre l'évolution expérimentale et simulée de la masse au cours du temps. L'évaporation moyenne expérimentale pour les trois ensoleillements d'une moyenne de 1 sun est égale à $0.74 \text{ kg.m}^2.\text{h}^{-1}$ et l'évaporation moyenne simulée est égale à $0.75 \text{ kg.m}^2.\text{h}^{-1}$ pour une efficacité moyenne de 49%. Ainsi, l'évolution simulée de la masse au cours du temps correspond bien à l'évolution mesurée par la balance avec une erreur de seulement 5%. Le modèle réagit bien aux trois ensoleillements pour l'évolution de la température, même si un écart apparaît concernant la température de surface. Il est difficile d'expliquer cet écart de quelques degrés Celsius qui pourrait venir du paramétrage du modèle ou de la caméra thermique. Avec des évolutions simulées en accord avec les évolutions expérimentales, le modèle peut être considéré comme validé dans cette configuration et peut être utilisé pour simuler le comportement du système d'évaporation au cours du temps. Enfin, il est à noter que la mousse de tannin ne peut pas être considérée comme un matériau efficace comparé à des matériaux qui atteignent des valeurs d'évaporation proches de $1.3 \text{ kg.m}^2.\text{h}^{-1}$ [11].

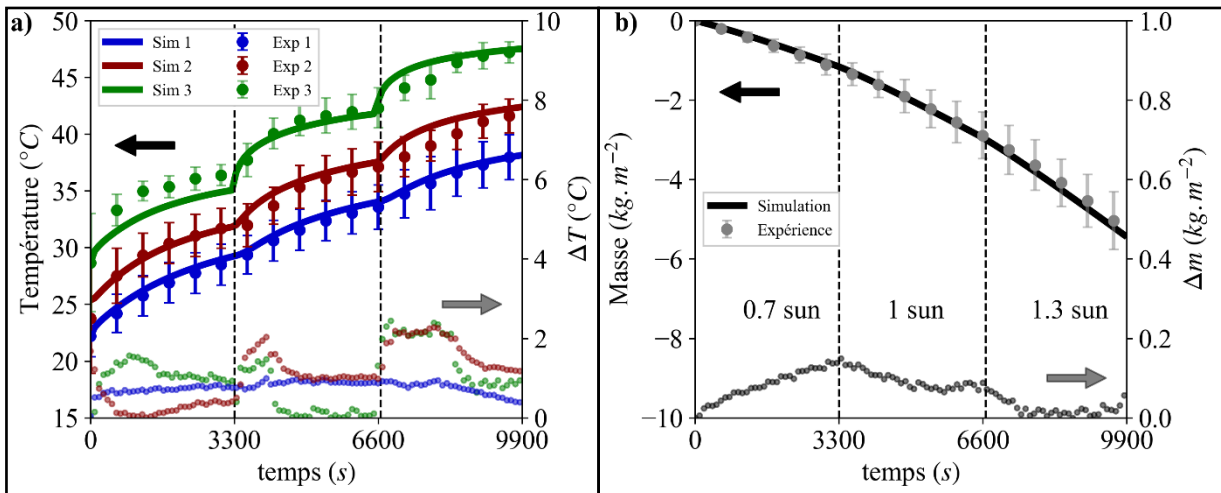


Figure 3. Températures expérimentales (points) et simulées (courbes) – axe de gauche ; Ecart entre températures simulées et mesurées – axe de droite

Figure 4. Evolution de la masse de l'eau évaporée au cours du temps – axe de gauche ; Ecart entre masse de l'eau simulées et mesurées – axe de droite

3.2. Étude paramétrique

3.2.1. Humidité relative

Comme l'évaporation est dépendante de la différence de concentration en eau entre la surface et l'air, l'humidité relative est un paramètre qui aura un impact sur les performances. Bien qu'elle soit contrôlable dans un laboratoire, elle ne l'est pas à l'air libre ou encore dans un lieu clos comme les systèmes d'évaporation expérimentaux d'échelle moyenne. Une température de 20°C est choisie pour ces calculs.

La Figure 5 présente le taux d'évaporation pour des humidités relatives allant de 10% à 90%, ainsi que l'efficacité correspondante. Entre 30% et 70%, qui représentent des variations raisonnables entre deux atmosphères différentes, un écart de 9% (ou 0.06 kg.m⁻².h⁻¹) d'évaporation est visible.

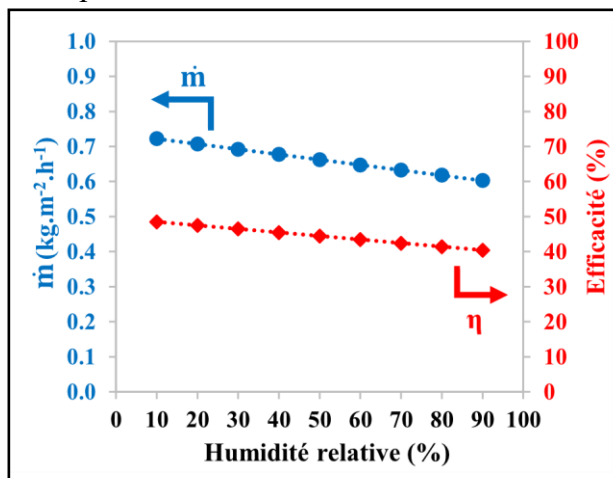


Figure 5. Taux d'évaporation simulée et efficacité en fonction de l'humidité relative de l'air

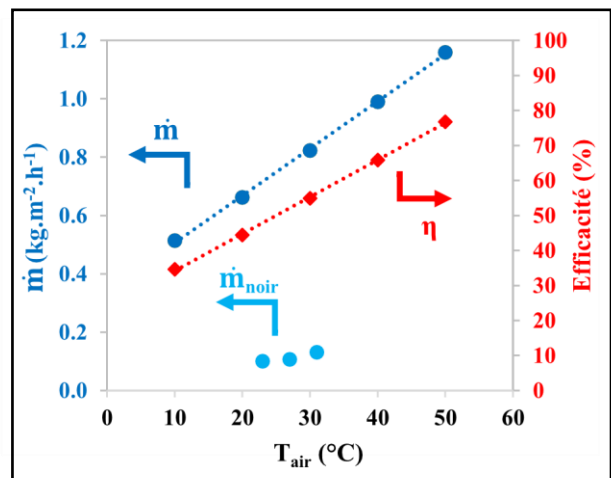


Figure 6. Taux d'évaporation simulée, taux d'évaporation expérimentale dans le noir [12] et efficacité en fonction de la température de l'air (avec un H_r fixé à 50%)

3.2.2. Température de l'air ambiant

Un des paramètres qui affecte l'évaporation est la température ambiante. Il est important de comprendre son effet sur les changements de performance du système. Pour cela, une humidité relative de 50% a été choisie et nous avons fait varier la température. La Figure 6 montre le taux d'évaporation en fonction des différentes valeurs de température, ainsi que l'efficacité. Lorsque la température augmente, le taux d'évaporation et l'efficacité augmentent de façon significative, avec un écart de 29% (0.15 kg.m⁻².h⁻¹) et de 10%, respectivement, pour une différence de 10°C, ce qui s'avère être une variation conséquente sur une journée. L'évaporation dans le noir est aussi susceptible de changer, comme le montre une précédente étude [12], lorsque la température augmente.

3.2.3. Épaisseur de la paroi isolante

Comme nous l'avons vu précédemment, les conditions extérieures affectent les performances [13]. Dans le cadre des mesures expérimentales, il peut être intéressant d'ajouter une couche de mousse isolante au système pour se concentrer sur l'étude des performances du matériau, à la surface d'évaporation.

La Figure 7 montre les performances du système en fonction de l'épaisseur de mousse isolante, de conductivité thermique 0.043 W.m⁻¹.K⁻¹, autour du béccher. Le taux d'évaporation augmente

jusqu'à se stabiliser vers $0.76 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, ce qui représente une augmentation de 20% par rapport au système sans isolation thermique. De plus, bien que 10 cm soit une épaisseur d'isolant beaucoup trop importante autour d'un béccher de 6 cm, une couche de 3 cm permet une augmentation du taux d'évaporation de 16%.

3.2.4. Puissance du flux solaire

Dans la littérature, les mesures expérimentales se font soit sous environnement contrôlé avec un rayonnement solaire simulé constant, soit en extérieur dans un caisson ou sous une cloche soumise au rayonnement du soleil. Ce rayonnement change tout au long de la journée. Pour simuler le comportement de l'évaporateur éclairé par un tel flux, des données d'ensoleillement typique d'un 21 Juin sans nuages à Paris ont été utilisées. Le pic d'ensoleillement pour cette journée est atteint à 10h57 et est de 1.02 sun et la moyenne est de 0.52 sun sur 24h ($1 \text{ sun} = 1 \text{ kW.m}^{-2}$). La Figure 8 montre l'évolution du taux d'évaporation et de l'efficacité pour cette journée ensoleillée. Compte tenu du calcul de l'efficacité (Equation (1)), la valeur calculée en début et en fin de journée est incohérente car elle fait intervenir un ensoleillement qui s'approche de 0. Néanmoins, une augmentation globale de l'efficacité avec l'avancement de la journée est visible. Elle est due à l'augmentation de la température à la surface d'évaporation en raison de la concentration du rayonnement solaire, ce qui améliore l'évaporation (Equations (5) et (7)). L'évaporation totale sur la période représentée est de 7.9 L par m^2 de surface de mousse.

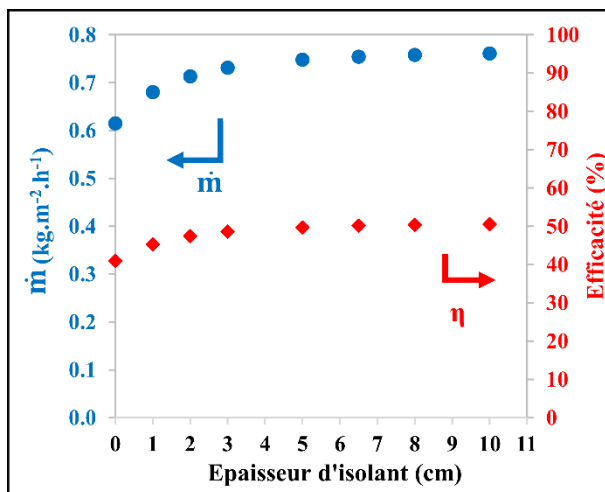


Figure 7. Taux d'évaporation et efficacité en fonction de l'épaisseur d'isolant autour du béccher (0 cm correspond au cas sans isolant)

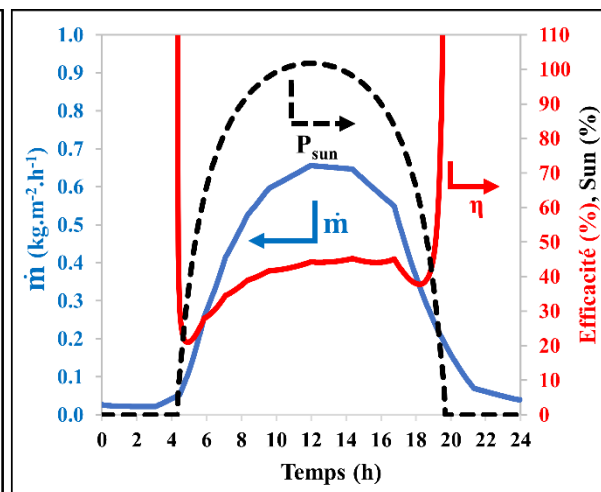


Figure 8. Taux d'évaporation et efficacité en fonction de l'ensoleillement

4. Conclusion

En utilisant un modèle axisymétrique en deux dimensions validé pour l'évolution de la masse et de la température, différents phénomènes ont pu être étudiés. Nous avons conclu que la température ambiante a un effet important sur les performances tandis que l'humidité a un effet moindre. Etant donné que ces valeurs évoluent généralement ensemble, il est important de les prendre en compte lors de mesures d'évaporation. L'étude de l'épaisseur d'un isolant installé autour du système de mesures montre que l'évaporation n'est plus améliorée à partir d'une certaine épaisseur. Ainsi, pour un béccher de 6 cm de diamètre, 3 cm suffisent à garantir une mesure qui est peu impactée par les conditions extérieures. Un ensoleillement typique d'une journée d'été à Epinal a été également évalué, et montre que la quantité théorique d'eau produite s'élèverait à 7.9 L par m^2 de surface de mousse. A la suite de ce travail, le modèle pourra être

utilisé pour optimiser les performances du système et proposer de nouveaux matériaux photothermiques, notamment en utilisant une imprimante 3D pour créer des géométries avec des surfaces d'échange et de diffusion élevées.

Références

- [1] C. Chen, Y. Kuang, L. Hu, Challenges and Opportunities for Solar Evaporation, *Joule*. 3 (2019) 683–718. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.023>.
- [2] P. Zhang, Q. Liao, H. Yao, Y. Huang, H. Cheng, L. Qu, Direct solar steam generation system for clean water production, *Energy Storage Mater.* 18 (2019) 429–446. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.10.006>.
- [3] F. Zhao, Y. Guo, X. Zhou, W. Shi, G. Yu, Materials for solar-powered water evaporation, *Nat. Rev. Mater.* (2020) 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0182-4>.
- [4] Y. Liao, J. Chen, D. Zhang, X. Wang, B. Yuan, P. Deng, F. Li, H. Zhang, Lotus leaf as solar water evaporation devices, *Mater. Lett.* 240 (2019) 92–95. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.12.133>.
- [5] X. Li, G. Ni, T. Cooper, N. Xu, J. Li, L. Zhou, X. Hu, B. Zhu, P. Yao, J. Zhu, Measuring Conversion Efficiency of Solar Vapor Generation, *Joule*. 3 (2019) 1798–1803. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.009>.
- [6] G. Tondi, V. Fierro, A. Pizzi, A. Celzard, Tannin-based carbon foams, *Carbon*. 47 (2009) 1480–1492. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.01.041>.
- [7] Z. Marie, V. Nicolas, A. Celzard, V. Fierro, First approach for modelling the physical foaming of tannin-based thermoset foams, *Int. J. Therm. Sci.* 149 (2020) 106212. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106212>.
- [8] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport phenomena* (2nd edition), John Wiley&Sons, Inc., New York, 2002.
- [9] V. Nicolas, F. Vanin, D. Grenier, T. Lucas, C. Doursat, D. Flick, Modeling bread baking with focus on overall deformation and local porosity evolution, *AIChE J.* 62 (2016) 3847–3863. <https://doi.org/10.1002/aic.15301>.
- [10] Y. CENGEL, *Heat Transfer a practical approach*, Second Edition, 2002.
- [11] R. Fillet, V. Nicolas, V. Fierro, A. Celzard, A review of natural materials for solar evaporation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 219 (2021) 110814. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110814>.
- [12] H. Song, Y. Liu, Z. Liu, M.H. Singer, C. Li, A.R. Cheney, D. Ji, L. Zhou, N. Zhang, X. Zeng, Z. Bei, Z. Yu, S. Jiang, Q. Gan, Cold Vapor Generation beyond the Input Solar Energy Limit, *Adv. Sci.* 5 (2018) 1800222. <https://doi.org/10.1002/advs.201800222>.
- [13] R. Fillet, V. Nicolas, V. Fierro, A. Celzard, Modelling heat and mass transfer in solar evaporation systems, *Int. J. Heat Mass Transf.* 181 (2021) 121852. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121852>.

Remerciements

Recherche soutenue financièrement par le Ministère des armées –Agence de l'innovation de défense