



HAL
open science

Métamatériaux pour la Génération de Vapeur par Energie Solaire

Lan Gao, Elyes Nefzaoui, Frédéric Marty, Xueyong Wei, Stéphane Bastide,
Yamin Leprince-Wang, Tarik Bourouina

► **To cite this version:**

Lan Gao, Elyes Nefzaoui, Frédéric Marty, Xueyong Wei, Stéphane Bastide, et al.. Métamatériaux pour la Génération de Vapeur par Energie Solaire. Colloque International Franco-Québécois (CIFQ) en Energie 2022, Jun 2022, Paris, France. hal-03698628

HAL Id: hal-03698628

<https://hal.science/hal-03698628>

Submitted on 14 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

METAMATERIAUX POUR LA GENERATION DE VAPEUR PAR ENERGIE SOLAIRE

Lan **GAO**^a, Elyes **NEFZAOUI**^{a*}, Frédéric **MARTY**^a, Xueyong **WEI**^b, Stéphane **BASTIDE**^c, Yamin **LEPRINCE-WANG**^a, Tarik **BOUROUINA**^a

^a ESYCOM lab., Univ Gustave Eiffel, CNRS, F-77454 Marne-la-Vallée, France

^b School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China

^c ICMPE, UMR 7182 CNRS-Université Paris Est Créteil, F-94320 Thiais, France

RÉSUMÉ

Nous présentons dans cet article une nouvelle classe de métamatériaux optimisés pour améliorer les performances de systèmes de génération de vapeur par énergie solaire. Le matériau proposé consiste en un réseau de micropores disposés en 2D et percés sur du silicium noir. L'optimisation de la conception de ce métamatériau est effectuée à l'aide d'un modèle numérique multiphysique. L'évaluation expérimentale de ce nouveau métamatériau sous un rayonnement incident d'un soleil montre un taux d'évaporation de 1,34 kg/(h.m²) correspondant à une efficacité de conversion de 89 %. Une alternative bas coût réalisable par impression 3D est également présentée et montre des performances comparables.

Mots Clés : énergie solaire, génération de vapeur, métamatériaux, milieux poreux

NOMENCLATURE

Symboles :

q densité de flux incident, W/m²
T température, K
L chaleur latente, J/kg
 \dot{m} débit massique, kg/s

sol solaire
a ambiante
e évaporation

Indices / Exposants :

v vapeur

1. INTRODUCTION

La distillation solaire est considérée comme l'une des approches les plus efficaces pour la purification de l'eau [1]–[5]. En outre, l'utilisation de l'énergie solaire rend le processus de purification de l'eau respectueux de l'environnement. D'autre part, les installations et les équipements nécessaires à ce processus sont relativement faciles à installer et à utiliser. Pour ces raisons, la technologie de distillation solaire a attiré l'attention de nombreux groupes de recherche au cours des dernières décennies. Pour atteindre une distillation solaire à haut rendement, plusieurs solutions ont été proposées telles

que des méthodes de préchauffage[6], [7], des méthodes de chauffage nocturne[8], [9] ou des méthodes couplées à des sources de chaleur supplémentaires pour augmenter la température de fonctionnement du système[10]–[13]. La génération solaire de vapeur (GSV) améliorée avec une feuille noire absorbante (FNA) est l'une de ces méthodes[14]. Pour améliorer l'efficacité de la GSV, de nombreux efforts ont été entrepris par différents groupes de recherche. Une première option consiste à utiliser les matériaux les plus appropriés au regard de leurs propriétés intrinsèques. Comme l'évaporation ne se produit qu'à l'interface air-eau, l'efficacité du GSV peut être augmentée en localisant le processus de chauffage à

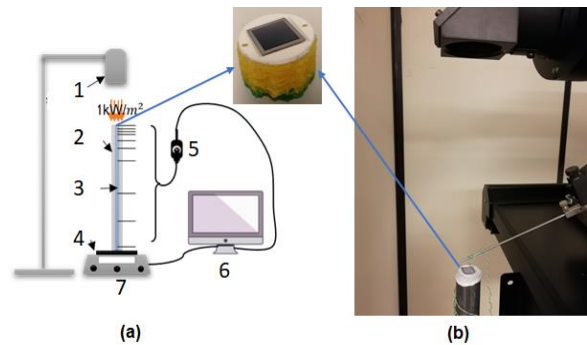
*Adresse électronique : elyes.nefzaoui@univ-eiffel.fr

cette interface et en réduisant le chauffage global du réservoir d'eau qui ne contribue pas directement au processus d'évaporation et peut donc être considéré comme un mécanisme de perte qui doit être minimisé. Une deuxième option consiste à augmenter l'efficacité de la production de vapeur en améliorant les conditions ambiantes pendant l'évaporation, par exemple en réduisant localement l'humidité ambiante, en augmentant la densité de puissance du rayonnement solaire incident par concentration[15] et en fournissant un flux d'air par convection forcée[16]. Nous présentons dans cet article un nouveau métamatériau à base de silicium noir, ou *Black Silicon* (B-Si), utilisable comme FNA pour améliorer la GSV. Les performances de ce matériau pour la génération de vapeur sont évaluées expérimentalement et se révèlent supérieures à celles de l'état de l'art. Nous présentons par ailleurs un métamatériau alternatif bas coût fabriqué par impression 3D.

2. METHODES

2.1. Expérience de génération de vapeur

Le dispositif expérimental est illustré sur la figure 1a, b. Il est principalement constitué d'un réservoir d'eau dont la surface est recouverte par le métamatériau à caractériser utilisé comme FNA, d'une source de rayonnement et des différents instruments de mesure. Un simulateur solaire (Oriol® LCS-100TM, Small Area Sol1A, 94011A-ES, AM 1.5 G) fournit une irradiation incidente de 1kW/m^2 . Le rayonnement incident au niveau de l'échantillon est mesuré avec un capteur de rayonnement (VOLTcraft, PL-110SM) à chaque fois avant utilisation. Le profil de température est mesuré à l'aide d'une caméra infrarouge (FLIR, a325sc) à la surface de l'échantillon et d'un ensemble de thermocouples (RS 409 - 4908 (PTFE) Thermocouple sensor, Type 'K') connectés à un enregistreur de données (PICO, TC-08) dans le réservoir d'eau. Pour éviter les fuites de vapeur depuis le bord de la colonne d'eau, nous recouvrons le réservoir avec du ruban en téflon. La perte de masse en temps réel pendant toute la durée de l'expérience est enregistrée à l'aide d'une balance de masse électronique contrôlée par ordinateur (KERN, KB2400-2N) avec une précision de $0,01\text{g}$. Toutes les expériences de GSV ont été réalisées à une température ambiante de $20\pm 2^\circ\text{C}$. L'humidité relative était de $58\pm 2\%$ et $36\pm 2\%$, respectivement pour le silicium noir et les métamousses imprimées en 3D pour l'évaporation de l'eau désionisée (DI). La température et l'humidité relative ont été contrôlées à l'aide d'un capteur multi-physique (KIMO, AMI 310).



1 : simulateur solaire, 2 : isolant, 3 : eau, 4 : base, 5 : thermocouples, 6 : enregistreur de données, 7 : balance.

Figure 1 : (a) Schéma du dispositif expérimental de GSV. (b) Photographie de la métamousse B-Si montée dans le dispositif expérimental réel.

2.2. Fabrication et caractérisation de la métamousse

2.2.1. Échantillons de B-Si

En tirant parti du processus de nanofabrication/microfabrication en salle blanche, la métamousse 2D peut être fabriquée à grande échelle à un coût réduit. Le B-Si perforé périodiquement est fabriqué sur un substrat de silicium monocristallin de 4 pouces de diamètre, d'une épaisseur de $390\pm 10\ \mu\text{m}$, poli sur les deux faces, avec une orientation (100) et un faible dopage en phosphore (résistivité électrique de $1\text{-}5\ \text{Ohm}\cdot\text{cm}$). La métamousse est produite selon une séquence en deux étapes, impliquant le traitement par plasma de la surface du silicium. Un film mince d'aluminium est d'abord déposé par pulvérisation sur les deux faces du substrat afin de servir de masque dur pour le processus de gravure ionique réactive profonde (DRIE). Une fine couche de résine photosensible est appliquée par pulvérisation sur la couche d'aluminium et sert de motif pour définir la structure périodique sur les deux faces du substrat. Le motif est ensuite transféré sur le masque dur par gravure au plasma de chlore de la couche d'aluminium. L'étape suivante consiste en une gravure profonde du silicium par un procédé Bosch dans un réacteur de gravure ionique réactive profonde ALCATEL A601E. Le procédé de gravure implique une gravure plasma multiplexée dans le temps comprenant des étapes de gravure et de passivation qui utilisent le gaz SF_6 pendant 5 secondes et des sous-étapes de passivation des parois latérales sous gaz C_4F_8 pendant 2 secondes. Plus de détails peuvent être trouvés par exemple dans nos travaux précédents[17]–[19]. Le processus est arrêté lorsque les motifs sont entièrement gravés à travers l'épaisseur de la plaquette. Le masque dur en aluminium est ensuite gravé par voie humide pour révéler la surface du silicium. La dernière étape de gravure consiste en la formation de B-Si au sommet des motifs périodiques et est réalisée dans le même réacteur à plasma configuré pour la gravure cryogénique. Le processus utilise une chimie SF_6/O_2 à une température de

-110 °C, le SF₆ étant le gaz de gravure et l'O₂ étant utilisé comme catalyseur pour la passivation des parois gravées. En ajustant le ratio SF₆/O₂, nous pouvons obtenir une surface de B-Si. comme le montre la Figure 2 où les images MEB du B-Si ont été prises par le microscope électronique à balayage (MEB) à haute résolution Zeiss NEON 40 (HR-SEM). Les paramètres fixes étaient la puissance de la source de 1000 W, la pression de 2 Pa et la tension de polarisation de 10 V. Les mécanismes de formation détaillés sont décrits dans notre travail précédent[18].

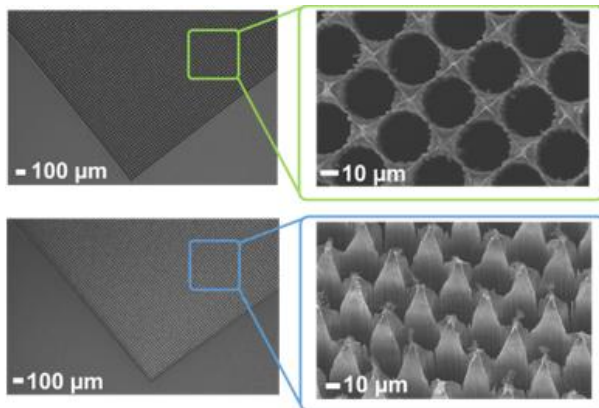


Figure 2 : Images MEB de la métamousse fabriquée à partir de micro-trous périodiques sur du silicium noir nanostructuré.

Une étape finale de découpe avec une scie à découper DAD350 Disco est effectuée pour obtenir des puces individuelles. La réflectance et la transmittance des échantillons de B-Si perforés sont mesurées par un spectromètre UV-Vis-NIR (Agilent, Cary 7000).

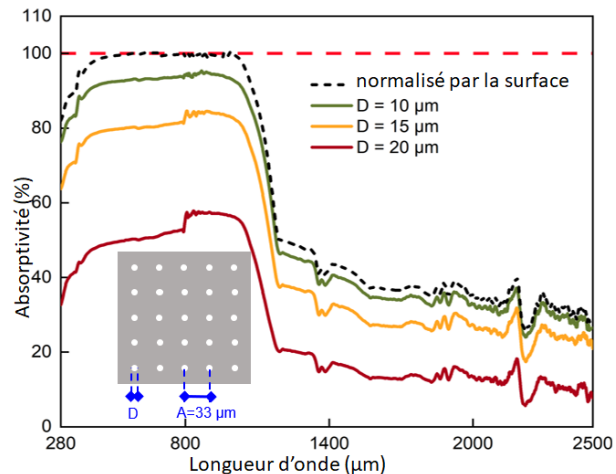


Figure 3 : absorptivité de différents échantillons du métamatériau étudié avec différents paramètres géométriques.

Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 3 et indiquent que les échantillons de B-Si perforés conservent une absorptivité élevée considérable dans la

gamme UV-Vis. Ces échantillons ont été utilisés comme couche supérieure de la FNA. Des échantillons avec trois tailles de pores différentes ont été fabriqués : $D = 10 \mu\text{m}$, $D = 15 \mu\text{m}$ et $D = 20 \mu\text{m}$, tous avec le même nombre de 100 000 pores sur une surface de 1 cm^2 , ce qui correspond à une porosité ε_1 variant de 0,079, 0,177 et 0,314, respectivement.

2.2.2. Échantillons à faible coût par impression 3D

Outre les échantillons de B-Si à haute performance, nous avons également fabriqué un métamatériau (où métamousse étant donné que ce sont des matériaux poreux) à l'aide d'un matériau à faible coût par la technologie d'impression 3D. À partir de fichiers de stéréo-lithographie (STL), les échantillons sont fabriqués à l'aide de l'appareil NANOArch® S130 de BOSTON MICRO FABRICATION, qui peut réaliser une impression 3D de haute précision à grande échelle. Tirant parti de la technologie μSL (Projection Micro Stereolithography), l'équipement utilise un système de projection de lithographie UV de haute précision pour projeter le motif à imprimer sur la surface liquide du réservoir de résine, solidifier la résine sur la surface liquide et traiter directement des formes tridimensionnelles et complexes à partir du modèle numérique pour achever la production des échantillons. Les matériaux d'impression disponibles sont variés. Comme la température de la surface de l'échantillon peut augmenter de manière significative pendant le processus d'évaporation, nous avons choisi un matériau résistant aux hautes températures (HTL), pour fabriquer notre métamousse imprimée en 3D. Ce matériau consiste en un composite produit par une dispersion de graphène dans une matrice polymère.

2.2.3. Assemblage des deux couches d'une métamousse

Une couche d'un matériau poreux commercial (éponge) a été découpé sous une forme cylindrique de 2 cm de diamètre et d'une épaisseur de 1,5 cm pour s'adapter au réservoir d'eau expérimental. En se référant à d'autres travaux de génération de vapeur améliorée dans la littérature[20], [21], la taille des pores des matériaux poreux naturels courants est généralement de 5 à 50 μm . Afin d'obtenir un contact total entre le matériau poreux commercial et les échantillons de B-Si perforés, un couvercle imprimé en 3D a été conçu et fabriqué selon la forme des échantillons de B-Si perforés en utilisant un matériau blanc d'acide polylactique (PLA). Une bonne fixation et une bonne étanchéité ont été assurées en utilisant plusieurs couches auxiliaires de ruban de téflon (Figure 1-b).

2.3. Simulation numérique

Afin d'optimiser la conception des métamatériaux, nous avons utilisé un modèle numérique multiphysique sous Comsol Multiphysics permettant de calculer le taux

de génération de vapeur avec différents métamatériaux. Le transport capillaire dans la mousse poreuse et le transport de la vapeur d'eau dans l'air sont modélisés à l'aide d'équations empiriques. L'évaporation de l'eau à la surface de la métamousse est décrite par un modèle de diffusion utilisant l'équation de Millington et Quirk. Les équations de transport d'espèces sont couplées aux équations de Navier-Stokes pour la modélisation du transfert thermique convectif, où les propriétés thermiques de la mousse poreuse sont prises en compte. L'ensemble du processus de transport de la vapeur dans l'air ambiant est spontané et n'est pas assisté par une convection forcée pour l'évacuation de la vapeur, ce qui signifie qu'il est assuré par la diffusion des espèces sous l'effet d'un gradient de concentration et par la convection naturelle qui résulte de la différence de température entre la surface de la FNA et l'air ambiant. Par rapport aux travaux précédemment rapportés [47], nous utilisons les équations Navier-Stokes compressibles dépendantes de la température dans le régime laminaire.

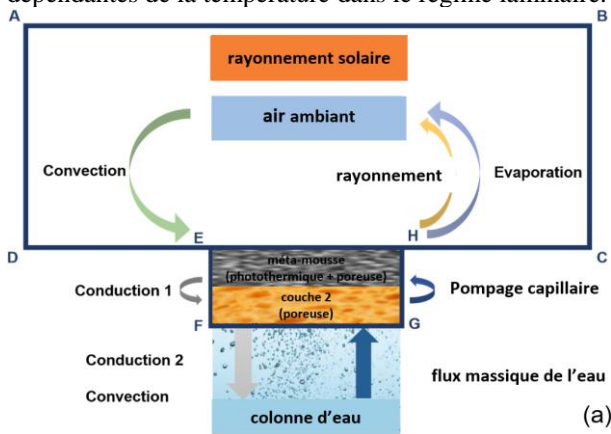


Figure 4 : Schéma d'un dispositif de génération de vapeur bicouche amélioré par FNA tel que considéré dans notre modèle numérique ainsi que les phénomènes physiques impliqués.

Comme montré sur la Figure 4, nous considérons une géométrie bidimensionnelle (2D) où nous pouvons clairement distinguer un bloc FNA bicouche (EHGF) et un bloc d'air ambiant (ABCD). Le bloc FNA a une épaisseur de 15 mm et une largeur de 10 mm. Il est imbriqué dans un bloc d'air plus grand dont les dimensions sont de 150 x 100 mm². Pour simplifier le modèle, nous faisons les hypothèses suivantes : (1) L'épaisseur de la surface fonctionnelle photothermique de la FNA est négligeable par rapport à l'épaisseur totale de la FNA ; (2) Les pertes radiatives sont localisées uniquement à la surface de la FNA ; (3) Le milieu poreux de la FNA est isotrope ; (4) L'humidité de l'air ambiant est constante, donc non affectée par la vapeur générée. Cela nécessite une évacuation efficace de la vapeur d'eau de la surface de la FNA ; (5) Seule la convection naturelle est prise en compte à la surface de la FNA. Des

informations supplémentaires sur le modèle numérique sont décrites dans [19].

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Limite asymptotique du taux de génération de vapeur

Si nous supposons un système de GSV amélioré par FNA idéal fonctionnant en régime permanent, où toutes les pertes thermiques (convectives, conductives et radiatives) sont négligées et où tout le rayonnement solaire incident est absorbé et exclusivement utilisé pour l'évaporation de l'eau, le débit de vapeur d'eau peut être donné par :

$$\dot{m}_v = \frac{q_{sol}}{L_v} \quad (1)$$

où, \dot{m}_v est le débit massique de la vapeur générée par unité de surface, $L_v = 2415.9$ kJ/kg est la chaleur latente d'évaporation (nous considérons une température ambiante constante $T_a = 293,15$ K et une température d'évaporation de $T_e = 309,15$ K) et $q_{sol} = 1000$ W/m². En utilisant ces différentes hypothèses, nous obtenons une limite supérieure pour le taux d'évaporation de 1,5 kg/h.m². Cette valeur est le taux d'évaporation maximal qui peut être obtenu avec un système de GSV amélioré idéal lorsque la récolte du rayonnement solaire est maximisée et que toutes les pertes sont minimisées. Nous notons que cette valeur est inférieure d'un ou deux ordres de grandeur aux valeurs du débit capillaire qui peuvent être obtenues en utilisant des milieux poreux courants, ce qui signifie que le débit capillaire n'est pas un facteur limitant. Ce résultat confirme également que le taux d'évaporation est principalement limité par l'apport énergétique au système et les pertes thermiques, qui constituent le goulot d'étranglement à optimiser.

3.2. Évaluation expérimentale de la métamousse 2D à base de silicium pour la génération de vapeur améliorée

Le premier type de métamousse, fabriqué uniquement à partir de silicium, est représenté schématiquement sur la Figure 5-a, et appelé métamousse 1. On montre sur la figure Figure 5-a une photo de l'assemblage de la métamousse carrée (noire) 1 sur un support circulaire (blanc) avec l'éponge commerciale en dessous (jaune) assurant l'isolation thermique. On représente sur la Figure 5-c les débits d'évaporation mesurés. Les résultats montrent que la métamousse B-Si améliore significativement l'efficacité de l'évaporation par rapport à l'évaporation de l'eau à l'air libre (courbe violette) et par rapport à l'évaporation avec une éponge commerciale ordinaire (courbe bleue), toutes deux prises comme références.

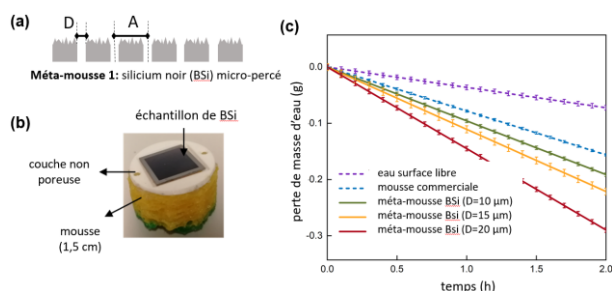


Figure 5 : Méta-mousses de silicium noir 2D : (a) description schématique en coupe transversale, (b) photo de l'assemblage utilisé pour les expériences (c) taux d'évaporation mesuré (perte d'eau) sur les trois métamousses considérées, comparé au taux d'évaporation de l'eau à l'air libre et au taux d'évaporation avec une éponge commerciale ordinaire.

Sous un rayonnement incident de un soleil, le taux d'évaporation de l'eau à l'air libre et de la mousse commerciale est de $0,35 \text{ kg}/(\text{h}.\text{m}^2)$ et $0,76 \text{ kg}/(\text{h}.\text{m}^2)$, respectivement. Lorsque le diamètre des pores augmente dans les métamousses 1, la porosité de la couche de B-Si augmente ainsi que le taux d'évaporation. Pour la métamousse 1 avec une perforation de diamètre $D = 10\text{-}\mu\text{m}$ (courbe verte), $D = 15\text{-}\mu\text{m}$ (courbe jaune) et $D = 20\text{-}\mu\text{m}$ (courbe rouge), et dont la surface est de 1 cm^2 , le taux d'évaporation est respectivement de $0,94 \text{ kg}/(\text{h}.\text{m}^2)$, $1,08 \text{ kg}/(\text{h}.\text{m}^2)$ et $1,34 \text{ kg}/(\text{h}.\text{m}^2)$.

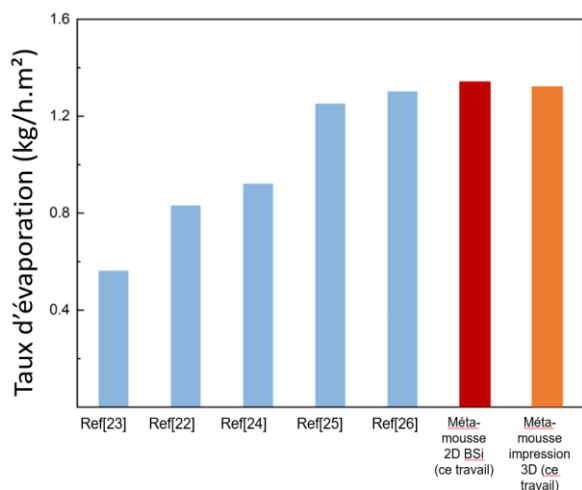


Figure 6 : Taux d'évaporation de la métamousse B-Si optimale et de la meilleure métamousse graphène-polymère imprimée en 3D conçue et fabriquée dans ce travail, comparé à d'autres résultats de la littérature mesurés dans des conditions expérimentales similaires, c'est-à-dire sous un éclairage solaire d'un soleil et dans des conditions ambiantes proche et à l'air libre, c'est-à-dire sans ventilation forcée.

Les échantillons de B-Si perforés périodiquement avec $D = 20 \mu\text{m}$ présentent le meilleur taux d'évaporation de $1,34 \text{ kg}/(\text{h}.\text{m}^2)$, soit 3,96 fois plus que le taux d'évaporation de

l'eau à l'air libre. Cela correspond à une amélioration de l'efficacité de la GSV de 22,4 % à 89,3 % sous rayonnement solaire direct. Il convient de mentionner que l'évaluation de l'efficacité est basée sur la limite théorique supérieure ultime de $1,50 \text{ kg}/(\text{h}.\text{m}^2)$ telle qu'introduite dans la section 3.1, prise comme référence pour une efficacité de 100%.

3.3. Comparaison des performances d'évaporation

On montre sur la Figure 6 les performances obtenues avec nos méta-matériaux en comparaison avec des résultats rapportés dans la littérature. Il convient ici de noter que les performances d'un système de GSV à FNA dépendent fortement du dispositif expérimental du chercheur et des conditions ambiantes pendant les expériences, telles que l'humidité et la température. Par conséquent, dans le tableau 1 et dans la figure 6, nous énumérons et comparons nos résultats avec les résultats d'évaporation améliorée précédemment rapportés, obtenus par d'autres groupes dans des conditions expérimentales similaires[22]–[26], montrant que la meilleure performance de ce travail dépasse la valeur de l'état de l'art parmi ces résultats comparables.

4. CONCLUSION

En conclusion, nous avons conçu, à l'aide d'un modèle numérique, une métamousse bicouche optimisée impliquant la combinaison d'un métamatériau fait de silicium noir périodiquement perforé ou, alternativement, fait de matériaux polymères imprimés en 3D contenant du graphène, avec une mousse commerciale à faible coût. Les paramètres clés de la génération solaire de vapeur assistée par une feuille noire absorbante bicouche ont été étudiés pour évaluer l'effet des paramètres les plus pertinents sur le taux de génération de vapeur à des fins d'optimisation. Les résultats obtenus ont été appliqués à la conception d'une structure poreuse optimisée de la couche supérieure. En utilisant cette classe de métamousses bicouches optimales, nous avons obtenu un taux d'évaporation de $1,34 \text{ kg}/(\text{h}.\text{m}^2)$ en utilisant une métamousse 2D B-Si perforée périodiquement sous une illumination d'un soleil, une valeur supérieure à l'état de l'art. En outre, une métamousse imprimée en 3D a été fabriquée et testée comme une alternative à faible coût à la métamousse 2D B-Si, montrant une très bonne performance en GSV et un fort potentiel grâce à son faible coût. Nous confirmons par ce travail que les métamousses bicouches optimisées sont des candidats de FNA très prometteurs pour la génération solaire de vapeur améliorée.

REMERCIEMENTS

Ce projet a reçu le soutien de l'initiative I-SITE FUTURE (référence ANR-16-IDEX-0003) dans le cadre du projet NANO-4-WATER ainsi que du projet METAWATER (ANR-20-CE08-0023 META-WATER).

RÉFÉRENCES

- [1] B. Chaouchi, A. Zrelli, et S. Gabsi, « Desalination of brackish water by means of a parabolic solar concentrator », *Desalination*, vol. 217, n° 1, p. 118-126, 2007.
- [2] S. Sharma et A. Bhattacharya, « Drinking water contamination and treatment techniques », *Applied Water Science*, vol. 7, n° 3, p. 1043-1067, 2017.
- [3] C. Tenthan, A. Madhlopa, et C. Z. M. Kimambo, « Improved solar still for water purification », 2012.
- [4] G. N. Tiwari, H. N. Singh, et R. Tripathi, « Present status of solar distillation », *Solar Energy*, vol. 75, n° 5, p. 367-373, 2003.
- [5] L. Ye, H. You, J. Yao, et H. Su, « Water treatment technologies for perchlorate: a review », *Desalination*, vol. 298, p. 1-12, 2012.
- [6] L. García-Rodríguez et C. Gómez-Camacho, « Preliminary design and cost analysis of a solar distillation system », *Desalination*, vol. 126, n° 1, p. 109-114, 1999.
- [7] Y. P. Yadav, « Performance analysis of a solar still coupled to a heat exchanger », *Desalination*, vol. 91, n° 2, p. 135-144, 1993.
- [8] G. S. Dhindsa et M. K. Mittal, « Experimental study of basin type vertical multiple effect diffusion solar still integrated with mini solar pond to generate nocturnal distillate », *Energy Conversion and Management*, vol. 165, p. 669-680, 2018.
- [9] P. Naveen Kumar, D. G. Harris Samuel, P. K. Nagarajan, et R. Sathyamurthy, « Theoretical analysis of a triangular pyramid solar still integrated to an inclined solar still with baffles », *International Journal of Ambient Energy*, vol. 38, n° 7, p. 694-700, 2017.
- [10] T. Arunkumar, D. Denkenberger, R. Velraj, R. Sathyamurthy, H. Tanaka, et K. Vinothkumar, « Experimental study on a parabolic concentrator assisted solar desalting system », *Energy Conversion and Management*, vol. 105, p. 665-674, 2015.
- [11] M. A. Eltawil et Z. M. Omara, « Enhancing the solar still performance using solar photovoltaic, flat plate collector and hot air », *Desalination*, vol. 349, p. 1-9, 2014.
- [12] A. E. Kabeel et M. Abdelgaied, « Observational study of modified solar still coupled with oil serpentine loop from cylindrical parabolic concentrator and phase changing material under basin », *Solar Energy*, vol. 144, p. 71-78, 2017.
- [13] G. M. Zaki, A. Al-Turki, et M. Al-Fatani, « Experimental investigation on concentrator-assisted solar-stills », *Solar Energy*, vol. 11, n° 3, p. 193-199, 1992.
- [14] G. Ni *et al.*, « Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration », *Nature Energy*, vol. 1, n° 9, p. 16126, sept. 2016, doi: 10.1038/nenergy.2016.126.
- [15] M. Zhu *et al.*, « Plasmonic wood for high-efficiency solar steam generation », *Advanced Energy Materials*, vol. 8, n° 4, p. 1701028, 2018.
- [16] Y. Guo, X. Zhou, F. Zhao, J. Bae, B. Rosenberger, et G. Yu, « Synergistic energy nanoconfinement and water activation in hydrogels for efficient solar water desalination », *ACS nano*, vol. 13, n° 7, p. 7913-7919, 2019.
- [17] S. Sarkar *et al.*, « NIR AND MIR ABSORPTION OF ULTRA-BLACK SILICON (UBS). APPLICATION TO HIGH EMISSIVITY, ALL-SILICON, LIGHT SOURCE », Seoul, KOREA, janv. 2019.
- [18] F. Marty *et al.*, « Advanced etching of silicon based on deep reactive ion etching for silicon high aspect ratio microstructures and three-dimensional micro-and nanostructures », *Microelectronics journal*, vol. 36, n° 7, p. 673-677, 2005.
- [19] L. Gao *et al.*, « Two-dimensional metamaterials as meta-foams for optimized surface-enhanced solar steam generation », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 243, p. 111793, août 2022, doi: 10.1016/j.solmat.2022.111793.
- [20] Y. Ito, Y. Tanabe, J. Han, T. Fujita, K. Tanigaki, et M. Chen, « Multifunctional porous graphene for high-efficiency steam generation by heat localization », *Advanced Materials*, vol. 27, n° 29, p. 4302-4307, 2015.
- [21] X. Hu *et al.*, « Tailoring Graphene Oxide-Based Aerogels for Efficient Solar Steam Generation under One Sun », *Advanced Materials*, vol. 29, n° 5, p. 1604031, 2017, doi: 10.1002/adma.201604031.
- [22] S. Ma *et al.*, « Recycled waste black polyurethane sponges for solar vapor generation and distillation », *Applied Energy*, vol. 206, p. 63-69, nov. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.169.
- [23] L. Zhang, B. Tang, J. Wu, R. Li, et P. Wang, « Hydrophobic light-to-heat conversion membranes with self-healing ability for interfacial solar heating », *Advanced Materials*, vol. 27, n° 33, p. 4889-4894, 2015.
- [24] J. Yang *et al.*, « Functionalized graphene enables highly efficient solar thermal steam generation », *ACS nano*, vol. 11, n° 6, p. 5510-5518, 2017.
- [25] Y. Li *et al.*, « 3D-printed, all-in-one evaporator for high-efficiency solar steam generation under 1 sun illumination », *Advanced materials*, vol. 29, n° 26, p. 1700981, 2017.
- [26] Y. Yang *et al.*, « Graphene-based standalone solar energy converter for water desalination and purification », *ACS nano*, vol. 12, n° 1, p. 829-835, 2018.