

Simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique

K. Touafek^{1*}, M. Haddadi², A. Malek³ et W. Bendaikha-Touafek¹

¹ Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
B.P. 88, Garat Ettaam, Ghardaïa

² Laboratoire de Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque
Ecole Nationale Polytechnique, 10 Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger

³ Division de l'Energie Solaire Photovoltaïque, Centre de Développement des Energies Renouvelables,
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

(reçu le 20 Janvier 2007 – accepté le 30 Mars 2008)

Résumé - Le capteur hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) convertit l'énergie solaire en chaleur et en électricité. Les avantages de combiner un collecteur thermique et un module PV dans un seul capteur sont l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale dans le cas d'utilisation sur un toit. Les coûts seraient également réduits, comparés aux deux systèmes (photovoltaïque et thermique) séparément installés. Nous présenterons dans cet article, une étude de simulation numérique sur le comportement thermique des capteurs hybrides à travers l'élaboration de la cartographie thermique du capteur hybride photovoltaïque thermique. La combinaison d'un capteur thermique et d'un panneau photovoltaïque dans un seul capteur permet l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire. Un effet de synergie peut être obtenu dans une structure associant ces deux dispositifs de façon judicieuse à ceux du système photovoltaïque et thermique séparément installés. Les résultats obtenus permettent de dire que le panneau photovoltaïque est un générateur d'énergie calorifique qui peut être exploité pour chauffer de l'eau, ou pour préchauffer l'espace, ou bien encore l'associer avec une pompe à chaleur pour la climatisation.

Abstract – The photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector converts the solar energy in heat and electricity. The advantages to combine a thermal collector and a photovoltaic panel in only one collector are the increase of the total efficiency of the solar energy conversion and the architectural uniformity in the case of use on a roof. The costs will also be reduced compared to the two systems (photovoltaic and thermal) installed separately. We will present in this document a numeric simulation on the thermal hybrid collector behaviour through the development of the thermal cartography of the thermal photovoltaic hybrid collector. The combination of a thermal collector and a photovoltaic panel in only one collector permits the increase of the efficiency of the total conversion of the solar energy. An effect of synergy can be gotten in a structure associating these two devices in a discriminating way to those of the photovoltaic and thermal system separately installed. The gotten results permit to say that the photovoltaic panel is a calorific energy generator that can be exploited to heat water or for the preheating of the space or again to associate it with a heat pump for the air-conditioning.

Mots clés: Capteur solaire – Photovoltaïque – Thermique – Hybride – Simulation numérique.

1. INTRODUCTION

Le soleil fournit une énergie colossale à la Terre (10 000 fois l'énergie nécessaire) sous forme lumineuse. Mais le problème réside en ce que la forme sous laquelle nous la recevons n'est pas nécessairement celle sous laquelle elle est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.

* khaledtouafek@yahoo.fr

L'appauvrissement des sources énergétiques traditionnelles (pétrole,..) due à une utilisation accrue de celles-ci et l'augmentation considérable du prix du pétrole, ... entraînent que l'étude des énergies renouvelables revêt une importance cruciale pour les années à venir. Les énergies renouvelables utilisables actuellement sont l'énergie hydraulique, le chauffage solaire actif, l'énergie éolienne, la géothermie, l'énergie solaire photovoltaïque, la biomasse, etc.

Les capteurs photovoltaïques et les capteurs thermiques permettent de transformer directement le rayonnement solaire en énergie électrique continue et en énergie thermique sous forme de chaleur et ceci respectivement à travers des panneaux photovoltaïques et des capteurs plans.

En général, deux types de capteurs PVT peuvent être distingués: collecteurs PVT avec verre - en couverts qui produisent la chaleur de haute température mais ont un rendement électrique légèrement inférieur, et les capteurs PVT sans vitre qui produisent de la chaleur relativement basse température mais possèdent de hautes performances électriques [10, 11].

Les capteurs hybrides sans vitre supplémentaire délivrent relativement de faibles températures, et doivent être combinés avec des pompes à chaleur pour chauffer de l'espace environnant ou de l'eau sanitaire [12, 13].

Une des applications des capteurs photovoltaïques, en combinaison non directe avec les capteurs thermiques, est le système SDHW (Solar Domestic Hot Water) qui consiste principalement à alimenter la résistance électrique interne, nécessaire au chauffage de l'eau par l'électricité générée par les capteurs photovoltaïques [14].

H.A. Zondag *et al.* [15] ont étudié l'effet de la résistance thermique sur le rendement du capteur hybride

On peut considérer pour des capteurs hybrides, un rendement total de conversion, qui est la somme du rendement thermique et du rendement électrique.

Y. Tripanagnostopoulos a appliqué le système basé sur le refroidissement des capteurs photovoltaïque aux capteurs hybrides à concentrateurs [16].

2. ELEMENTS CONSTITUTIFS DES CAPTEURS THERMIQUES PLAN

2.1. L'absorbeur

C'est l'élément essentiel du capteur thermique. Il a pour rôle d'absorber le rayonnement solaire, ensuite le transformer en chaleur et enfin transmettre cette chaleur au fluide caloporteur.

Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse (étude de l'inclinaison et de l'orientation). Cette surface doit être dotée d'un coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevé possible.

Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95. Seules les couleurs foncées permettent d'obtenir des valeurs aussi élevées, l'idéal étant le noir évidemment. Par ailleurs, il vaut mieux que cette couleur ait été obtenue par un traitement (chimique ou autre) plutôt que par une couche de peinture (celle-ci étant toujours plus ou moins isolante).

Pour limiter les pertes par réémission de rayonnement infra-rouge, il importe que l'absorbeur possède aussi la propriété d'émissivité superficielle la plus faible possible (valeur inférieure à 0,15). Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de sélectif.

Après transformation du rayonnement en chaleur sur la face superficielle exposée, il y a lieu de transmettre cette chaleur au fluide. Pour ce faire, la plaque doit être métallique, car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre: 300; aluminium: 200; acier: 60).

2.2 Système de refroidissement par le fluide caloporteur

Quel que soit le système, le contact entre la tubulure véhiculant le fluide et la plaque absorbante doit être très intime: soit par emboutissage, soit par soudure. De même, l'espacement

entre la tuyauterie devra être rigoureusement calculé en fonction du diamètre du tube, de l'épaisseur de la plaque et des matériaux employés.

2.3 Isolation et vitrage

Le capteur devant recevoir et capter le rayonnement solaire, doit être nécessairement en contact avec le milieu extérieur, les conditions de température et de climat risquent de perturber considérablement son bon fonctionnement.

Limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur est primordial si on cherche à optimiser les performances de ce dernier. Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation arrière et latérale.

Vers l'avant, comme le rayonnement solaire doit arriver par l'absorbeur, on ne peut utiliser que des matériaux transparents: verre en simple ou en double vitrage, trempé ou non, ou certains matériaux plastiques ayant la propriété de réaliser l'effet de serre (c'est le cas de matériaux comme le polycarbonate, le méthacrylate et le tedlar). Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés, avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres.

Les pertes par transmission peuvent également être éliminées en plaçant l'absorbeur sous vide, ce qui permet d'obtenir un rendement élevé même à hautes températures. Ce type de capteur est d'ailleurs surtout utilisé pour certaines applications demandant des températures plus élevées du fluide caloporteur (jusqu'à 150°C).

3. LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE

Les capteurs solaires thermiques peuvent servir au chauffage des habitations, ainsi qu'au chauffage de l'eau. L'installation servant au chauffage de l'eau est appelée 'chauffe-eau solaire'.

Le chauffage de l'eau (Fig. 1) pour les douches, le lavage de la vaisselle et la lessive est l'une des utilisations les plus rentables de l'énergie solaire. Des milliers de nouveaux chauffe-eau solaires sont installés chaque jour dans le monde.

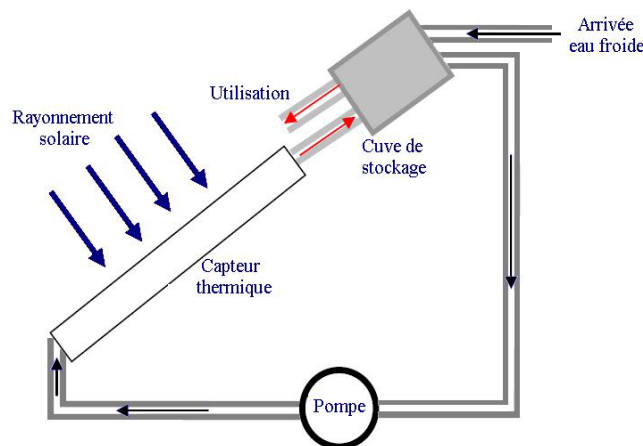


Fig. 1: Schéma synoptique d'un chauffe-eau solaire

4. LES TRANSFERTS D'ENERGIE DANS LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE

L'énergie captée par le collecteur solaire et transformée en chaleur est cédée au fluide caloporteur puis transférée vers un réservoir de stockage. Ce transfert se fait soit par circulation naturelle, soit par circulation forcée.

4.1 Transfert par circulation naturelle de l'eau

Dans ces installations, le transfert d'énergie est basé sur la plus faible densité de l'eau chaude qui confère à celle-ci un mouvement ascendant.

4.2 Système direct avec thermocirculation et appoint dans le stockage

L'eau entrant par le bas du capteur est chauffée par l'ensoleillement et sort en partie haute pour rejoindre le ballon de stockage situé à au moins 60 cm au-dessus du capteur. Un appoint (résistance électrique ou apport quelconque de chaleur via un échangeur) est intégré dans la partie supérieure du stockage alors que l'eau chaude solaire en occupe la partie basse.

Lorsqu'il n'y a pas d'ensoleillement, seule l'eau située dans la partie supérieure du ballon est chauffée par l'appoint. Ceci évite de chauffer toute l'eau à condition qu'il y ait une stratification des couches en fonction de la température. Cette stratification existe dans les ballons bien conçus: l'eau chaude se trouve en partie supérieure et l'eau froide en partie inférieure.

Lorsque le capteur est chauffé par le soleil, le fluide caloporteur, c'est-à-dire l'eau dans ce cas, se met en mouvement pour rejoindre le ballon. Ce dernier se vide à sa base d'une quantité correspondante d'eau froide qui retourne au capteur. En cas d'utilisation de l'eau sanitaire, l'eau chauffée par le soleil va monter de la partie inférieure du ballon vers la partie supérieure.

4.3 Système indirect avec thermocirculation et appoint hors du stockage

Dans ce cas, le chauffe-eau possède deux circuits: l'un dit 'primaire' contient l'eau qui est chauffée dans le capteur, tandis que le circuit 'secondaire' est alimenté par l'eau à réchauffer.

Le transfert de chaleur s'effectue par un échangeur situé dans le ballon. L'appoint est situé en dehors du stockage. Comme la circulation n'est pas forcée, on veillera, comme dans le système précédent, à placer le bas du ballon à au moins 60 cm au-dessus du haut du capteur et à simplifier au maximum le circuit de canalisations. Le double circuit a l'avantage d'éviter la purge du système en cas de gel.

Le placement de l'appoint à l'extérieur de ballon permet au capteur de fonctionner librement sans que l'apport réalisé par l'appoint devienne excessif. Par contre, ce type d'installation est plus coûteux et la présence de l'échangeur nécessite que le capteur travaille à plus haute température ce qui diminue son rendement.

4.4 Transfert par circulation forcée

L'installation utilise ici, en plus des éléments utilisés dans les systèmes précédents, une pompe de circulation commandée par une régulation de température.

Le rôle de la pompe de circulation est de permettre un transfert plus rapide des calories captées par l'absorbeur vers le réservoir de stockage. L'utilisation de cette pompe permet aussi d'interrompre le transfert de chaleur lorsque l'eau des capteurs n'est pas plus chaude que celle contenue dans le réservoir.

C'est le rôle de la régulation de comparer les deux températures (à la sortie du capteur solaire et dans le réservoir de stockage) et de commander la pompe de circulation uniquement lorsque la première température est supérieure à la deuxième. En pratique, les régulateurs disponibles sur le marché permettent à l'utilisateur de fixer indépendamment la différence de température à l'enclenchement (entre 5 et 10 °C) et au déclenchement du circulateur (entre 2 et 5 °C).

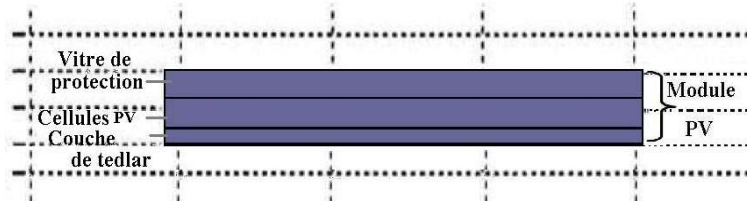
5. SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU CAPTEUR HYBRIDE

Nous avons étudié la distribution de la température dans les différentes couches du capteur hybride. Nous avons établi par simulation numérique le comportement thermique de ce capteur hybride photovoltaïque/thermique, ainsi que la cartographie de température pour cinq configurations (Fig. 2).

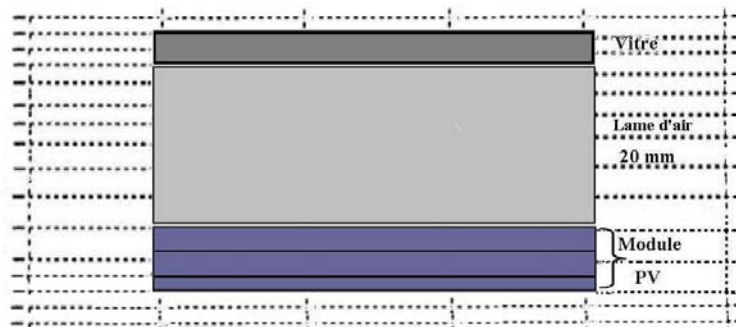
La première configuration représente le capteur photovoltaïque isolé thermiquement et non recouvert. La deuxième configuration était le capteur photovoltaïque isolé thermiquement, et sur lequel une vitre supplémentaire a été déposée.

La troisième configuration était l'installation d'un échangeur de chaleur, constitué d'une plaque en cuivre et d'un serpentin en tubes de cuivre, au-dessous du module photovoltaïque. Nous supposons l'état stationnaire, c'est-à-dire que le fluide s'écoule à l'intérieur de la tubulure et qu'il n'y a pas de circulation pendant la durée de la simulation.

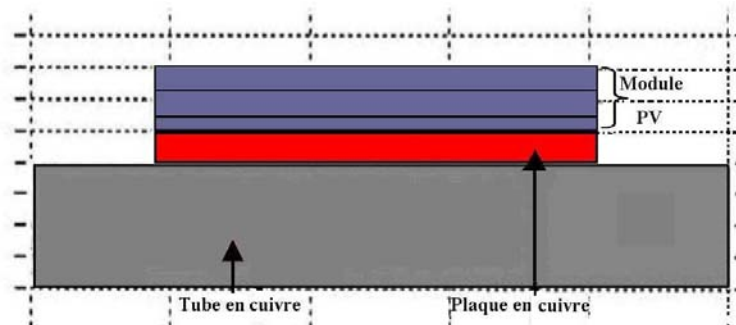
Tandis que dans la quatrième configuration, nous avons ajouté une vitre supplémentaire au-dessus du capteur. Et enfin nous avons déposé une seconde vitre au-dessus du capteur hybride, représentant ainsi la cinquième configuration.



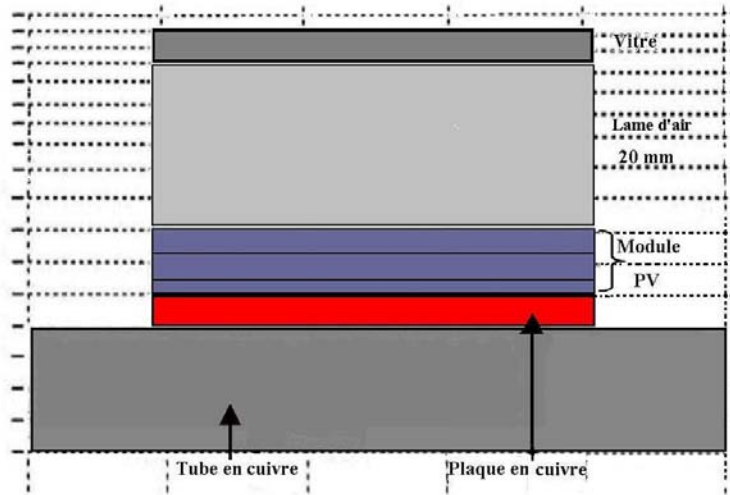
1^{ère} configuration: Module photovoltaïque isolé thermiquement et non recouvert



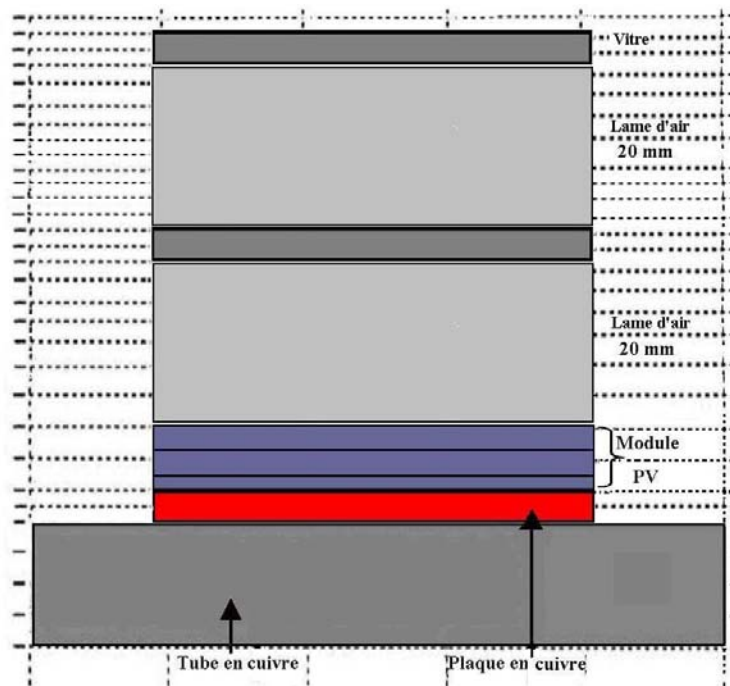
2^{ème} configuration: Capteur photovoltaïque isolé thermiquement et recouvert d'une vitre



3^{ème} configuration: Capteur hybride non recouvert



4^{ème} configuration: Capteur hybride recouvert d'une vitre



5^{ème} configuration: Capteur hybride recouvert de deux vitres

Fig. 2: Les cinq configurations proposées pour l'étude de simulation du capteur hybride

5.1 Méthode de résolution

Nous avons utilisé le logiciel de calcul 'Femlab™' spécialisé dans le domaine de la résolution des équations numériques. Le transfert de chaleur qui nous intéresse est basé sur la discrétisation

des équations différentielles partielles. La méthode des éléments finis est utilisée par ce logiciel pour résoudre les problèmes dynamiques stationnaires et transitoires.

5.2 Résolution du problème sous Femlab™

Parmi les logiciels de programmation existants dans la littérature, le logiciel Femlab™, contient de nombreuses options, qui le rendent très souple à l'utilisation dans de nombreux domaines et pour plusieurs cas d'études [18].

Parmi ces options, l'interface graphique que nous utilisons pour simuler le transfert de chaleur dans le capteur hybride. Le logiciel Femlab™ offre d'abord la possibilité de dessiner ou de réaliser un objet qu'on veut étudier en utilisant l'option 'Draw Mode', puis on traduit notre problème (équation d'énergie ou autres, coefficients, conditions aux limites et conditions initiales) sous la forme générale, en utilisant la méthode des éléments finis, on commence par:

1) Définir notre équation:

- problème parabolique
- problème elliptique
- problème hyperbolique ou autre.

2) Définir les conditions initiales et les conditions aux limites: si elles sont du type Newman ou Dirichlet en spécifiant tous les détails, etc...

Le fonctionnement du Femlab™ se résume comme suit:

1. Description géométrique
2. Initialisation des données en faisant un maillage initial (condition initiale)
3. Maillage en faisant rentrer les conditions aux limites
4. Affiner le maillage
5. Assemblage de toutes les données
6. Résolution numérique
7. Affichage des résultats.

5.2.1 Description géométrique

La représentation géométrique peut être faite selon deux possibilités:

- en utilisant l'interface graphique;
- en entrant dans le programme Untitled.m.

On obtient la représentation suivante (Fig. 3).

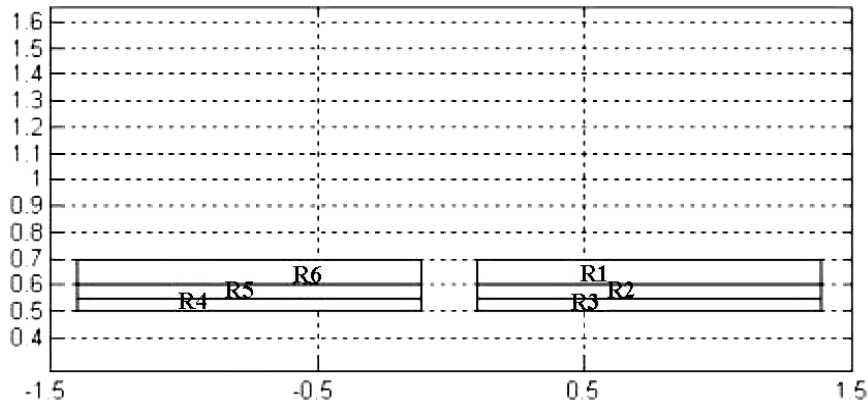


Fig. 3: Description géométrique dans le logiciel Femlab™

5.2.2 Le maillage

Le maillage se fait automatiquement selon deux possibilités, soit en utilisant l'interface graphique, ou soit en entrant dans le programme Untitled.m.

On obtient la représentation de la figure 4.

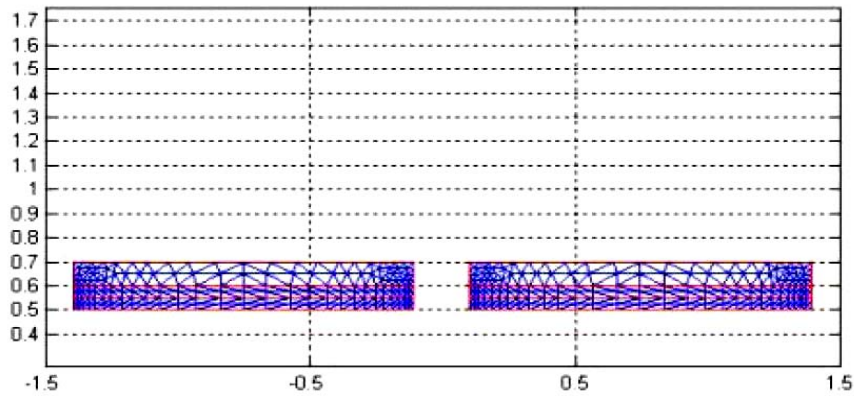


Fig. 4: Le maillage

5.2.3 Conditions aux limites

La figure 5 montre l'interface du logiciel Femlab™ utilisé pour imposer les conditions aux limites de notre problème.

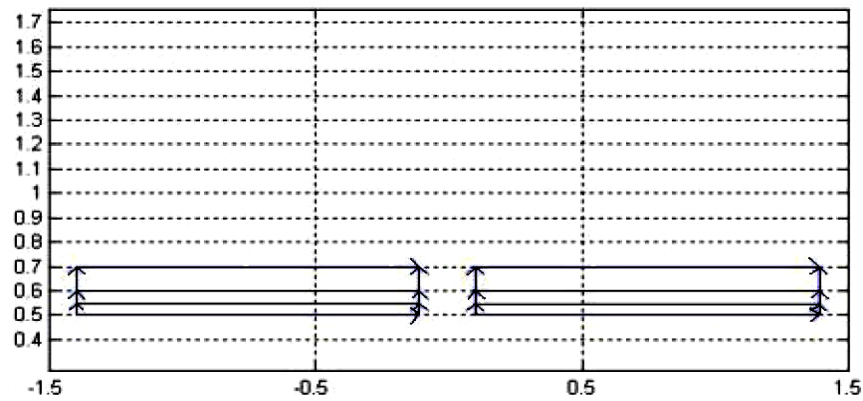


Fig. 5: Représentation des conditions aux limites Dirichlet ou Neumann

6. RESULTATS OBTENUS

Seules les quatre configurations de notre capteur hybride photovoltaïque/thermique ont été simulées, en supposant que le régime est stationnaire (permanent).

Le module photovoltaïque est constitué de trois couches: la couche protectrice de verre, la couche des cellules et la couche de tedlar en face arrière. Il a été supposé une isolation latérale et transversale parfaite.

6.1 Distribution de la température dans le capteur isolé et non recouvert

La figure 6 représente la distribution de la température dans le capteur isolé thermiquement et non couvert (schéma de droite). On constate que les températures de la couche de cellules et de la couche de tedlar sont plus élevées qu'au niveau de la vitre protectrice.

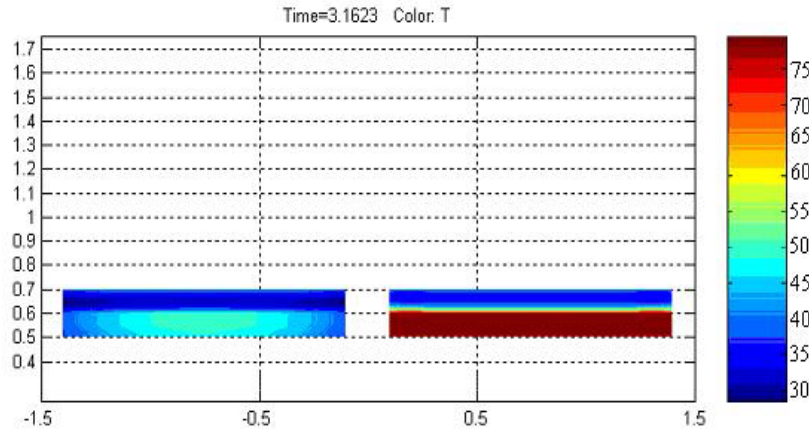


Fig. 6: Distribution de la température dans le module photovoltaïque isolé (droite) et libre (gauche)

Un zoom a été effectué sur les trois couches du module photovoltaïque isolé (Fig. 7). Nous remarquons que la température des cellules est légèrement plus élevée que celle de la couche de tedlar, ceci peut être expliqué par le fait que le module photovoltaïque joue le rôle de générateur thermique.

L'ordre de grandeur des températures est montré sur les figures 6 et 7, la température des cellules du capteur isolé thermiquement peut atteindre les 80 °C.

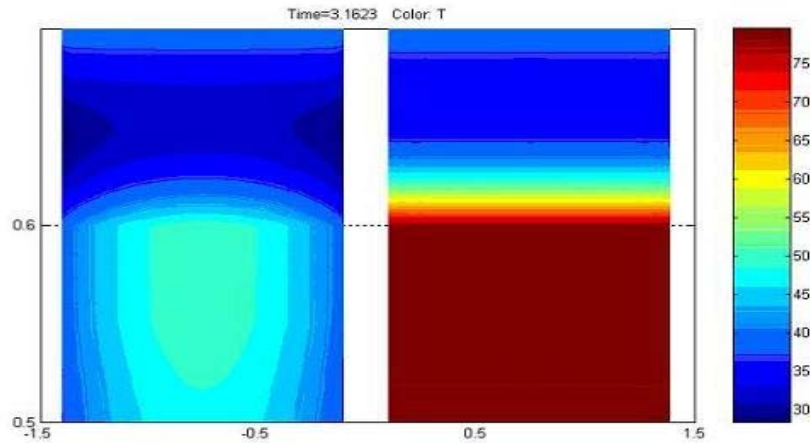


Fig. 7: Zoom sur le module photovoltaïque isolé (droite) et libre (gauche)

Pour ce qui concerne le module photovoltaïque non isolé (Fig. 6-gauche- et Fig. 7-gauche-), on remarque que:

- Premièrement, la distribution de la température est la même que dans le capteur isolé, c'est-à-dire que la température dans la couche de silicium est plus élevée que la température dans la face arrière représentée par du tedlar et dans la face avant pour les raisons évoquées.
- L'ordre de grandeur des températures est de l'ordre de 50 °C au niveau de la cellule.
- Les températures à gauche et à droite du capteur sont plus basses, et ceci parce que le capteur est libre et non isolé.

6.2 Distribution de la température dans le capteur isolé et couvert de vitre

Nous avons simulé le comportement thermique du capteur isolé thermiquement et avec une vitre supplémentaire au-dessus, déposée à 2 cm.

Les résultats trouvés (Fig. 8) montrent une augmentation des températures dans toutes les couches du capteur et particulièrement sur sa face avant. Ceci peut être expliqué par l'effet de serre causé par l'ajout de la vitre en verre, piégeant ainsi les rayons solaires.

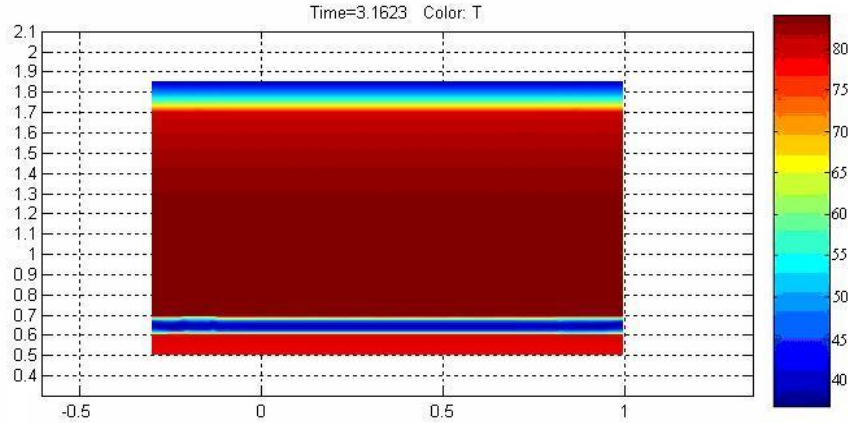


Fig. 8: Modèle thermique photovoltaïque + verre

6.3 Distribution de la température dans le capteur hybride et non recouvert

Nous avons simulé pour la troisième configuration, le capteur dit hybride, qui est constitué du module isolé thermiquement et sous lequel est placé un échangeur de chaleur composé de tubulures de 8 mm de diamètre intérieur.

La figure 9 donne la distribution de la température dans les différentes couches du capteur hybride en régime établi (régime stationnaire) avec fluide caloporteur (de l'eau) immobile pendant la durée de la simulation.

Nous remarquons que la température de sortie du fluide atteint les 40 °C au bout de quelques secondes pour une température d'entrée fixée à 20 °C ce qui montre le gain en énergie thermique réalisé. En même temps, la température de la cellule a chuté aux alentours de 45 °C. Rappelons qu'elle dépassait les 70 °C dans la première configuration dans laquelle il n'y avait pas d'échangeur. Il y a eu donc un refroidissement du capteur.

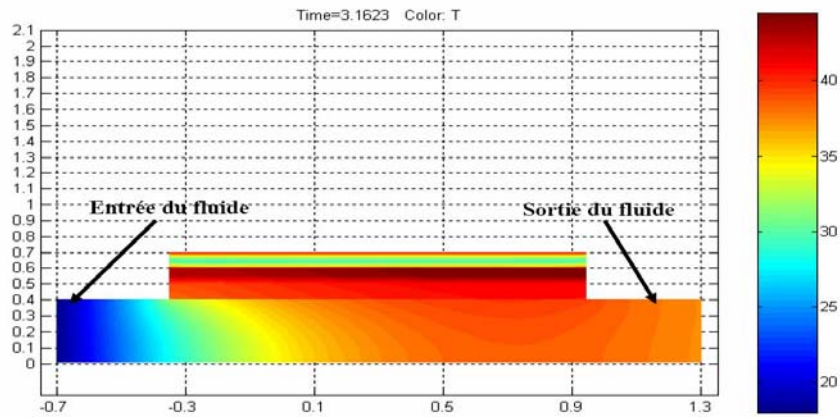


Fig. 9: Distribution de la température dans le capteur hybride

6.4 Distribution de la température dans le capteur hybride recouvert

La dernière configuration consiste dans l'ajout d'une vitre au capteur hybride. Nous avons obtenu la distribution de température donnée sur la figure 10.

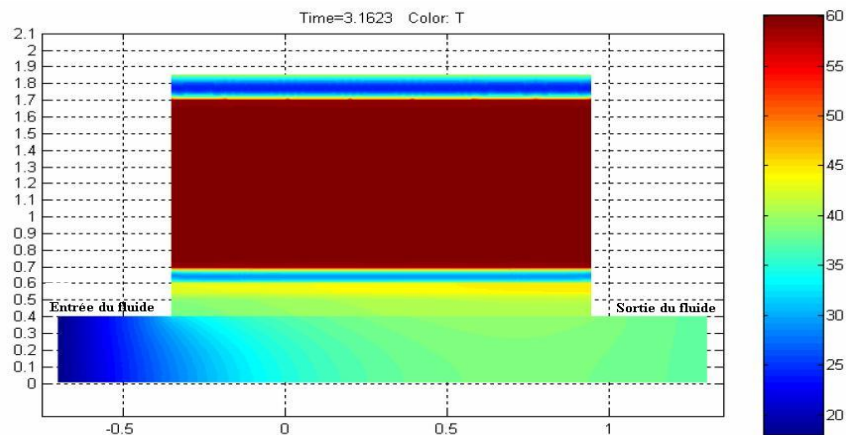


Fig. 10: Distribution de la température dans le capteur hybride avec vitre
Circulation du fluide (eau)

On remarque en premier lieu, que la température de sortie du fluide est plus élevée par rapport à celle du capteur hybride sans le vitrage et ceci pour la même température d'entrée.

La température du module est plus faible par rapport au cas où il n'y avait pas d'échangeur de chaleur. Cette configuration améliore donc les performances thermiques du capteur hybride tout en faisant baisser la température de la cellule du module.

6.5 Distribution de la température dans le capteur hybride recouvert de deux vitres supplémentaires

Enfin nous obtenons la cartographie de la température pour les différents couches du capteur hybride dans le cas de l'ajout d'une seconde vitre [19] (Fig. 11).

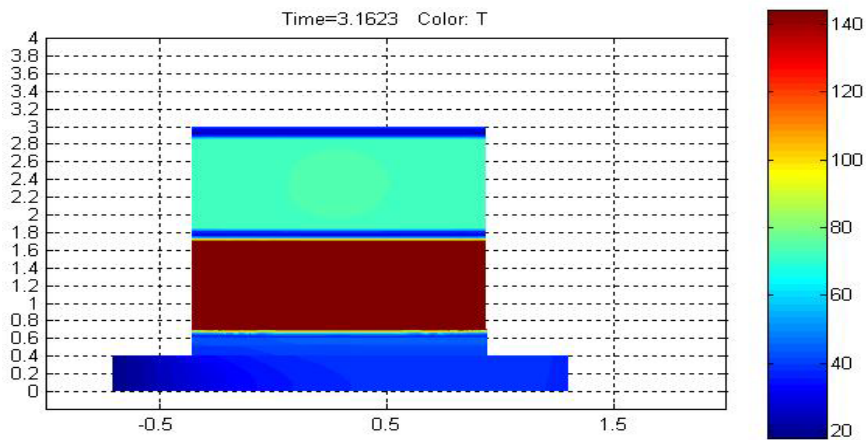


Fig. 11: Capteur hybride avec les deux vitres déposées

La cartographie réalisée pour cette configuration indique, en premier lieu que la température du fluide caloporteur a augmenté davantage par rapport au cas d'une seule vitre et, en deuxième

lieu nous remarquons une montée de la température sur la face avant du capteur (face des cellules photovoltaïques) et qui dépasse 140 °C et enfin la température de la deuxième vitre est inférieure à la température de la première, ceci peut être expliqué par le cumul d'énergie calorifique réalisé au niveau de la première vitre.

7. CONCLUSION

Au cours de la conversion photovoltaïque dans le capteur solaire, une chaleur est générée, augmentant ainsi la température au niveau de la cellule photovoltaïque et causant une chute de son rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non absorbée par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement. D'autre part, cette partie du rayonnement absorbé est perdue sous forme de chaleur. L'objectif de ce travail est double, augmenter l'efficacité électrique du capteur, c'est-à-dire son rendement électrique en diminuant la température de fonctionnement et utiliser cette même chaleur pour chauffer de l'eau ou l'espace environnant.

Dans cet article, les résultats de la simulation numérique sur le comportement thermique du capteur hybride photovoltaïque thermique y sont présentés et discutés. En effet, il a été établi la cartographie thermique du capteur à travers la variation de la température au niveau de chaque couche.

Nous pouvons dire que les capteurs hybrides sont de véritables systèmes de cogénération permettant ainsi la production simultanée de l'énergie électrique et de l'énergie calorifique.

On peut résumer les avantages de combiner ainsi un collecteur thermique avec un module photovoltaïque, dans l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale dans le cas d'utilisation sur un toit. Les coûts aussi seront réduits comparés aux deux systèmes (photovoltaïques et thermiques) séparément installés.

L'utilisation d'une vitre supplémentaire augmente la température du capteur hybride et améliore par conséquent son rendement énergétique thermique. L'ajout d'une seconde vitre augmente davantage les performances thermiques, mais risque de diminuer le rendement électrique du capteur hybride qui dépend fortement de la température de fonctionnement du capteur.

REFERENCES

- [1] A. Suzuki and S. Kitamura, 'Combined Photovoltaic and Thermal Hybrid Collector', Proceedings of the 1st Photovoltaic Science and Engineering Conference in Japan, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 19, Supplement 19-2, pp. 79 - 83, 1979.
- [2] T. Russell, 'Combined Photovoltaic/Thermal Collector Panels of Improved Design', IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 990 - 996, 1981.
- [3] R. Tscharnner, H. Curtins, J.P. Häring, J. Schwarz and A.V. Shah, 'Low Temperature Liquid PV/T Collector', 5th Photovoltaic Solar Energy Conference, (CEC), pp. 560 - 564, 1983.
- [4] B. Lalovic, T. Pavlovic, Z. Kiss and J. Van dine, 'The Application of Hybrid a-Si:H PV and Thermal Collectors for Different Usages', 8th Photovoltaic Solar Energy Conference, (CEC), pp. 280 - 283, 1988.
- [5] S.V. Sudhakar and M. Sharon, 'Fabrication and Performance Evaluation of a Photovoltaic/Thermal Hybrid System', SESI Journal, Vol. 4, N°1, pp. 1 - 7, 1994.
- [6] K. Touafek, A. Malek et M. Haddadi, 'Etude Expérimentale du Capteur Hybride Photovoltaïque Thermique', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp. 143 - 154, 2006.
- [7] L.W. Florschuetz, 'Extension of the Hottel-Whillier Model to the Analysis of Combined Photovoltaic/Thermal Flat Plate Collectors', Solar Energy, Vol. 22, pp. 361 - 366, 1979.
- [8] T. Takashima, 'New Proposal for Photovoltaic/Thermal Solar Energy Utilization Method', Solar Energy, Vol. 52, N°3, pp. 241 - 245, 1994.

- [9] T. Bergene and O.M. Lovvik, 'Model Calculations on a Flat-Plate Solar Heat Collector with Integrated Solar Cells', *Solar Energy*, Vol. 55, N°6, pp. 453 - 462, 1995.
- [10] M.J.M. Jong, 'System Studied on Combined PV/Thermal Panels', Elftes symposium Thermische Solarenergie, 9-11 May, Kloster Banz, Staffelstein, Germany, 2001.
- [11] M.J.M. Jong and H.A. Zondag, 'System Studies on Combined PV Thermal Panels', 9th International Conference on Solar Energy in High Latitudes, Northsun 2001, 6-8 May, The Netherlands, 2001.
- [12] M. Bakker, K.J. Strootman and M.J.M. Jong, 'PVT Panels: Fully Renewable and Competitive', ISES, SWC Göteborg, Germany, 2003.
- [13] H.A. Zondag, W.G.J. van Helden, 'PV-Thermal Domestic Systems', 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11-18, 2003.
- [14] A.A. Ghoneim, A.Y. Al-Hasan and A.H. Abdullah, 'A Economic Analysis of Photovoltaic-Powered Solar Domestic Hot Water Systems in Kuwait', *Renewable Energy*, Vol. 25, N°1, pp. 81 – 100, 2002.
- [15] H.A. Zondag, M.J. Elswijk, M. Bakker, 'PV-Thermal Collector Development – An Overview of the Lessons Learnt', 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 7-11 June, Paris, France, 2004.
- [16] Y. Tripanagnostopoulos, 'Low Concentration Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Energy Systems', IP programme: 'ICT Tools: PV Systems Teaching and Learning Patra', 1st July-10th July, 2004.
- [17] H.A. Zondag, D.W. de Vries, W.G.J. Van Helden, R.J.C. Van Zolingen and A.A. Van Steenhoven, 'The Thermal and Electrical Yield of a PV-Thermal Collector', *Solar Energy*, Vol. 72, N°2, pp. 113 - 128, 2002.
- [18] K. Touafek, 'Etude d'un Capteur Solaire Hybride Photovoltaïque Thermique', Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.
- [19] K. Touafek, M. Haddadi, A. Malek, W. Touafek, 'Etude d'un Capteur Solaire Hybride', 8^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique, Centre Universitaire de Béchar, Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.