

Estimation « in situ » de l'efficacité de capteurs solaires sous vide pour la production d'eau chaude

Estimation of the efficiency of evacuated tubes solar collectors for hot water production

Julien GAMBADE^{1*}, Hervé NOËL¹, Patrick GLOUANNEC¹, Anthony MAGUERESSE¹

¹Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

* (auteur correspondant : julien.gambade@univ-ubs.fr)

Résumé – Dans le cadre d'un projet européen visant à développer les énergies renouvelables dans les exploitations agricoles, une installation solaire dédiée à la production d'eau chaude a été instrumentée. Le site est équipé de 24 capteurs solaires thermiques à tube sous vide qui ont la particularité d'avoir un stockage intégré. Le fonctionnement d'un capteur associé à son dispositif de stockage a été suivi durant plusieurs semaines. La communication est focalisée sur l'étude de trois journées. L'objectif est d'estimer l'efficacité d'un capteur en conditions dynamique et statique.

Mots-clés : Solaire thermique ; Instrumentation « in situ » ; Bilan énergétique ; Stockage intégré ; Transferts thermiques.

Abstract – As part of a European project to develop the use of renewable energy, a solar installation in operation has been instrumented. The installation is composed of 24 solar thermal collectors with evacuated tubes and integrated storage. The operation of one collector was studied during three separate days in order to estimate its efficiency in dynamic and static conditions. Its particularity was taken into account in order to determine its energy performance “in situ”.

Keywords: Solar thermal; “In situ” measurements; Energy balance; Integrated storage; Heat transfers.

Nomenclature

A	aire brute capteur solaire, m ²
c_p	chaleur spécifique, kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹
$CCSV$	Capteur solaire à tubes sous vide
h_r	coefficient échange radiatif, W.m ⁻² .K ⁻¹
h_{cv}	coefficient échange convectif, W.m ⁻² .K ⁻¹
H	irradiation solaire, MJ.m ⁻²
\dot{m}	débit massique, kg.hr ⁻¹
Q	énergie, kJ
V	volume du réservoir, m ³
R_{th}	résistance thermique, K.W ⁻¹
S	Surface, m ²
T	température, °C

Symboles grecs

ε	émissivité
η	rendement
λ	conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹
ρ	masse volumique, kg.m ⁻³
σ	constante de Stefan-Boltzmann
φ	flux thermique

Indices et exposants

amb	ambient
ent	entrée du réservoir
ext	extérieur
int	intérieur
moy	moyenne
s	surface
sor	sortie du réservoir

1. Introduction

L'Union Européenne s'est engagée à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le projet européen ICare4Farms a donc été lancé afin de développer la part d'énergie renouvelable dans le secteur de l'agriculture en Europe du Nord-Ouest [1]. Il vise plus spécifiquement à promouvoir l'énergie solaire thermique dans l'agroalimentaire où les besoins en eau chaude représentent 40% de la consommation en énergie.

Dans le but de fiabiliser le solaire thermique pour des installations conséquentes, il est nécessaire de caractériser leur fonctionnement. Le site suivi dans le cadre de ces travaux est en fonctionnement depuis Juin 2019. Il s'agit d'un élevage de veaux implanté dans les Côtes d'Armor. Cette communication introduit dans un premier temps le fonctionnement des capteurs solaires thermiques à tubes sous vide ainsi que le fonctionnement de l'installation complète. Les choix sur la métrologie et sur les séquences de mesures utilisées sont ensuite expliqués. Enfin, l'exploitation des mesures permet d'élaborer des bilans énergétiques qui sont introduits puis analysés pour trois séquences de mesure espacées dans le temps.

2. Descriptif de l'installation

Dans une journée classique, l'exploitation consomme deux fois par jour un volume important d'eau chaude. La température de l'eau nécessaire pour préparer l'alimentation des animaux est de 80°C. Pour subvenir à ces besoins, une installation constituée de 24 Capteurs Solaire à tubes sous vide non pressurisés avec circulation directe du fluide caloporteur dans les tubes par thermosiphon et ballon de stockage (CSSV) est mise en place. Dans la littérature, des études ont été réalisées sur ce type de capteur [2,3,4]. Certaines études se sont intéressées à l'assemblage en série de plusieurs chauffe-eaux solaires différents [5]

Le CSSV employé est constitué de 30 tubes et d'un réservoir de 241 Litres. La température de l'eau contenu dans les tubes va augmenter progressivement en fonction du rayonnement solaire. L'eau chaude étant moins dense que l'eau froide, une circulation naturelle va se mettre en place (Figure 1). L'eau chaude va remonter des tubes directement vers le réservoir tandis que l'eau plus froide fera le chemin inverse.

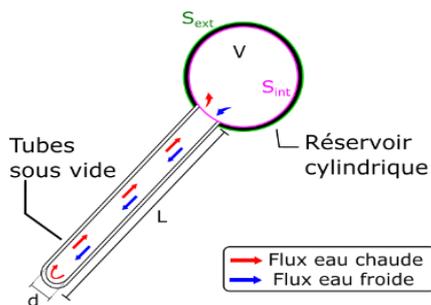


Figure 1 : Circulation naturelle au sein d'un CSSV

Volume du réservoir V	241 L
Épaisseur de polyuréthane e	60 mm
Surface extérieure du réservoir S_{ext}	3,9 m ²
Surface intérieure du réservoir S_{int}	2,9 m ²
Longueur des tubes L	1,80 m
Diamètre intérieur des tubes d	4,7 cm
Volume d'eau approximatif par tube	2,6 L

Tableau 1 : Paramètres du CSSV

Les capteurs sont répartis en deux lignes parallèles. Chaque rangée est composée de 6 CSSV reliés en série pour le préchauffage de l'eau et 6 CSSV reliés en parallèle pour le stockage et le chauffage complémentaire. Les ballons de stockage des CSSV en série sont constamment remplis et à volume variable pour les capteurs en parallèle.

A l'issue d'un soutirage, un remplissage lent de 7 à 8 heures est réalisé afin de remplir les CSSV. Ce processus est répété deux fois par journée. Le faible débit de remplissage utilisé (environ 5 litres/minute) favorise la stratification au sein du réservoir ce qui améliore le rendement du système [6,7].

3. Métrologie et méthodes

3.1. Instrumentation

L'installation solaire fonctionne depuis Juin 2019. Il était impossible d'interrompre son fonctionnement pour la mise en place l'instrumentation réalisée de Juillet à Septembre 2020. La principale contrainte sur la métrologie fut donc de choisir des capteurs non intrusifs. Ainsi le site a été équipé de débitmètres ultrason afin de mesurer les débits de remplissage et de soutirage. L'implantation de 16 thermocouples type K a pu être faite sans vidanger les ballons. 4 thermocouples chemisés en inox ont été placés dans la partie supérieure de 4 réservoirs. De plus, 2 thermocouples type K ont été placés directement sur les conduites et protégés par une gaine isolante, afin de mesurer les températures d'entrée et de sortie du capteur. Enfin, 1 CSSV en série et 1 en parallèle disposent de 4 sondes de température afin d'étudier la stratification en leur sein. Le positionnement de ces thermocouples (figure 2) est contraint par l'obligation d'utiliser l'unique entrée disponible en partie haute du réservoir.

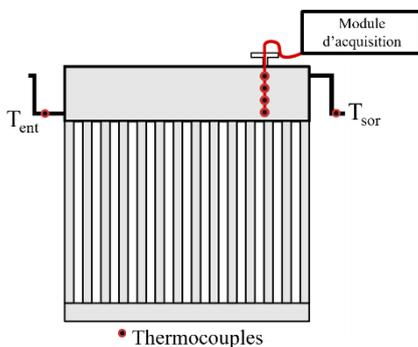


Figure 2 : Instrumentation du CSSV

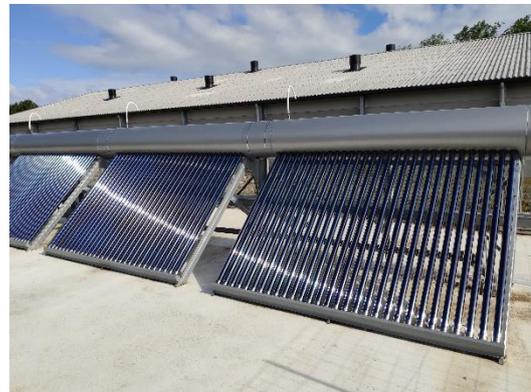


Figure 3 : Photographie du site

Une instrumentation conséquente a également été déployée afin de bien appréhender les conditions climatiques locales.

Un pyranomètre mesure l'irradiance solaire globale hémisphérique sur le plan horizontal tandis que deux irradiance mètres mesurent les éclairagements énergétiques hémisphériques sur les faces avant et arrière du capteur. Le rayonnement grandes longueurs d'onde avec le ciel est mesuré par un pyrgéomètre. Celui-ci permet d'évaluer la température de ciel apparente. Une station météo est mise en place pour mesurer la direction et la vitesse du vent, la température ambiante, l'humidité relative et la pression atmosphérique. L'ensemble des mesures sont récupérées sur un serveur en ligne avec un pas de temps d'une minute.

Débitmètre KAIFENG	Thermocouple type K	Pyranomètre HUKSEFLUX	Pyrgéomètre HUKSEFLUX	Irradiancemètre INGENIEURBÜRO
±1 %	±0.5 °C	±1 %	±15 %	±2,5 %

Tableau 2 : Incertitudes des instruments de mesure

3.2. Bilan énergétique

Trois séquences de mesures de 24 heures ont été choisies pour être analysées afin d'étudier des périodes différentes. Les deux premières journées sélectionnées sont le 26 Septembre et le 4 Novembre. Les profils de remplissage sont de même durée pour les deux jours avec deux remplissages, le matin et le soir.

Compte tenu du fonctionnement spécifique (discontinu) de l'installation, l'étude énergétique de l'installation sur une journée est divisée en trois phases observables sur les figures 4 et 5 :

- La première période débute à minuit et finit à la fin du premier remplissage (Période 1)
- La seconde période allant de la fin du premier remplissage au début du second (Période 2)
- La troisième période allant du début du second remplissage à minuit (Période 3)

Le mode de fonctionnement des CSSV utilisés ne permet pas de dresser le même bilan énergétique que pour des capteurs plans ou à tubes sous vide plus répandus. En effet, le ballon de stockage permet de conserver l'eau chaude durant la nuit si les apports énergétiques sont plus importants que les besoins journaliers. Deux énergies sont calculées : la première est liée à la variation de température lors du transit de l'eau de circulation dans le ballon ($Q_{\dot{m}}$) et la seconde à la variation d'énergie interne du ballon ($Q_{stockée}$). Les équations 1 et 2 sont associées respectivement aux deux énergies.

$$Q_{\dot{m}} = \int_{t_{début}}^{t_{fin}} \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{Sor} - T_{ent}) \cdot dt \quad (1)$$

$$Q_{stockée} = \int_{t_{début}}^{t_{fin}} \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{\partial T_{moy}}{\partial t} \cdot dt \quad (2)$$

Avec T_{moy} , la moyenne des 4 mesures des thermocouples immergés. Les incertitudes relatives aux deux énergies sont données en fonction des équations 3 et 4 suivantes et prennent en compte uniquement les erreurs sur les instruments de mesure :

$$\frac{\Delta Q_{\dot{m}}}{Q_{\dot{m}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{sortant}}{T_{sortant}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{entrant}}{T_{entrant}}\right)^2} = 1,7\% \quad (3)$$

$$\frac{\Delta Q_{stockée}}{Q_{stockée}} = \sqrt{2 \times \left(\frac{\Delta T_{moy}}{T_{moy}}\right)^2} = 0,7\% \quad (4)$$

L'ensemble des mesures effectuées sert à établir un bilan énergétique. L'objectif est de comparer l'énergie récupérée au sein du ballon en fonction de l'énergie incidente $H_{Incident}$ et de l'aire brute du capteur, A , à l'aide de l'équation 5. L'irradiation $H_{Incident}$ est obtenue en calculant l'intégrale de l'éclairement énergétique reçu sur le plan incliné sur l'ensemble de la journée.

$$\eta = \frac{Q_{\dot{m}} + Q_{stockée}}{H_{Incident} \cdot A} \quad (5)$$

4. Présentation des mesures

4.1. Bilans énergétiques des séquences avec soutirages

Les deux journées présentent des conditions d'éclairement différentes. L'évolution de la température dans le réservoir pour les deux séquences sont données sur les figures 4 et 5. Les profils de soutirages correspondent à des profils de routine. On observe que la journée du 26/09 présente des passages nuageux à l'inverse du 4/11.

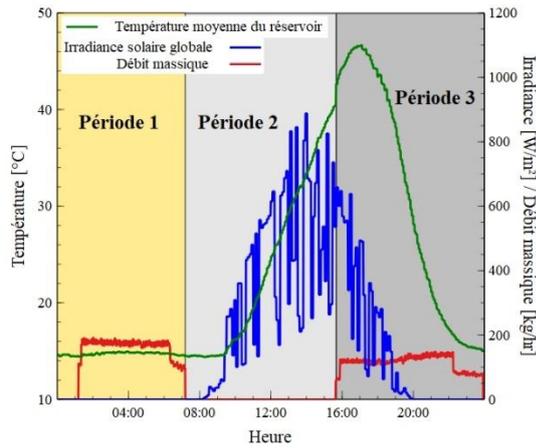


Figure 4 : Evolution du débit massique, de l'irradiance solaire globale et de la température dans le CSSV (26/09)

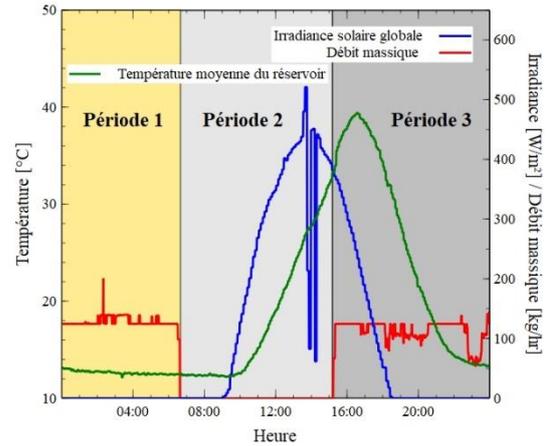


Figure 5 : Evolution du débit massique, de l'irradiance solaire globale et de la température dans le CSSV (4/11)

Les valeurs des énergies pour le 26 Septembre et le 4 Novembre sont synthétisées dans le tableau suivant :

	26 Septembre			4 Novembre		
	1 ^{ère} période	2 ^{ème} période	3 ^{ème} période	1 ^{ère} période	2 ^{ème} période	3 ^{ème} période
$Q_{\dot{m}}$ [kJ]	-460±8	0	40327±686	-659±11	0	30186±513
$Q_{stockée}$ [kJ]	-147±1	26101±182	-25579±179	-600±4	20894±146	-20087±141

Tableau 3 : Récapitulatifs des énergies calculées pour les journées du 26/09 et 4/11

On constate que l'énergie due au débit massique est faiblement négative durant la première période. Cela se justifie par le fait que la température de sortie du réservoir est légèrement inférieure à la température en entrée. Durant la deuxième période, le débit circulant au sein du CSSV est nul. Par conséquent, $Q_{\dot{m}}$ est nulle. Au cours de la dernière période, 40327 et 30186 kJ ont été fournis par le capteur solaire, respectivement le 26/09 et le 4/11.

La période la plus importante pour le stockage d'énergie est la deuxième période. On observe que la grande majorité de cette énergie stockée est ensuite transférée aux capteurs suivants lors de la troisième période. Cela s'explique par le fonctionnement des capteurs en série qui ont pour fonction principale de préchauffer l'eau dans l'installation. Ils permettent par ailleurs de constituer une réserve énergétique pour les journées peu ensoleillées.

Les rendements calculés pour les deux essais à l'aide de l'équation 5 sont donnés dans le tableau 4.

	26 Septembre	4 Novembre
$Q_{\dot{m}} + Q_{stockée}$ [kJ]	40242	29735
$H_{incident} \times A$ [kJ]	86772	86211
Rendement [-]	0,46	0,34

Tableau 4 : Valeurs expérimentales de rendements du CSSV

On observe que les rendements sont différents alors que les éclairagements énergétiques sont très proches pour les deux journées. Cet écart peut s'expliquer d'une part par des températures environnementales plus faibles (respectivement des écarts de 5°C et 8°C pour les températures ambiantes et du ciel) et d'autre part, par un angle d'incidence plus favorable le 26/09 comme

l'on peut l'observer sur les figures 6 et 7. Associé à des valeurs d'irradiance supérieures, le rendement est meilleur malgré les passages nuageux plus nombreux que durant la journée du 4/11.

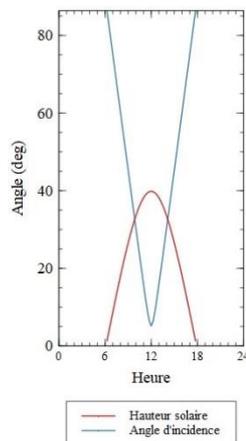


Figure 6 : Hauteur solaire et angle d'incidence pour la journée du 26/09

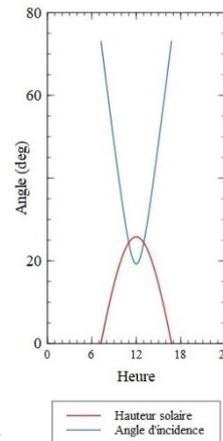


Figure 7 : Hauteur solaire et angle d'incidence pour la journée du 4/11

4.2. Analyse des résultats de l'essai inerte

La troisième journée, du 28 Novembre, intervient dans une période de vide sanitaire où aucun soutirage n'apparaît. Les résultats de cette journée vont permettre d'étudier le comportement du CSSV en période statique. Sur la figure 3 est présentée la température moyenne du réservoir en fonction de l'éclairement énergétique sur le plan horizontal.

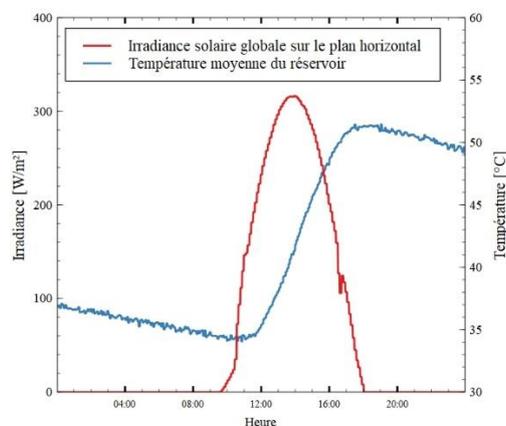


Figure 8 : Evolution de l'irradiance solaire et de la température moyenne du réservoir durant la journée du 28/11

L'étude de l'installation sans soutirage permet d'appréhender les déperditions thermiques du réservoir. Sur les périodes nocturnes du matin et du soir, on mesure une variation d'énergie stockée de -249 kJ/hr et -388,9 kJ/hr respectivement.

La résistance thermique du ballon de stockage R_{th} s'écrit selon l'équation 6 suivante :

$$R_{th} = \frac{\frac{1}{S_{ext} \cdot h_r} \times \frac{1}{S_{ext} \cdot h_{cv}}}{\frac{1}{S_{ext} \cdot h_r} + \frac{1}{S_{ext} \cdot h_{cv}}} + \frac{e}{S_{moy} \cdot \lambda} + \frac{1}{S_{int} \cdot h_{eau}} \quad (6)$$

Avec h_{cv} le coefficient d'échange convectif de la paroi externe du réservoir, h_r le coefficient d'échange radiatif linéarisé, e l'épaisseur de l'isolant, λ la conductivité thermique du

polyuréthane et S_{int} , S_{ext} et S_{moy} , respectivement les surfaces intérieure, extérieure et moyenne du réservoir. Le coefficient h_{cv} est calculée avec une corrélation utilisant la vitesse du vent [8]. La résistance thermique associée à la convection au sein du réservoir est négligée pour les prochains calculs car elle est très faible comparée aux autres résistances.

La température de surface du réservoir, T_s , est calculée à partir du bilan énergétique en surface (équation 7) :

$$T_s = \frac{\frac{S_{moy} \cdot \lambda}{e} \cdot T_e + S_{ext} \cdot h_{cv} \cdot T_{amb} + S_{ext} \cdot h_r \cdot T_{ciel}}{\frac{S_{moy} \cdot \lambda}{e} + S_{ext} \cdot h_{cv} + S_{ext} \cdot h_r} \quad (7)$$

Le flux convectif s'exprime selon l'équation 8 suivante :

$$\phi_{cv} = h_{cv} \cdot S_{ext} (T_s - T_{amb}) \quad (8)$$

Les échanges radiatifs sont linéarisés et le flux radiatif est calculé selon l'équation 9 :

$$\phi_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot S_{ext} \cdot (T_m + 273,15)^3 \cdot (T_s - T_{ciel}) \quad (9)$$

Avec σ la constante de Stefan-Boltzmann et ε l'émissivité du réservoir déterminée expérimentalement. T_m est la moyenne des températures ambiantes et du ciel.

La différence entre les déperditions thermiques le matin et le soir ne peut pas s'expliquer par l'impact du vent sur le coefficient d'échange convectif du réservoir car la vitesse du vent est constante sur les 24 heures. La figure 9 montre que la température du ciel chute durant l'après-midi tandis que la température ambiante varie entre 10 et 15°C. La figure 10 illustre l'augmentation des échanges radiatifs entre le capteur (réservoir plus tubes) et le ciel. Le flux convectif est globalement négatif : sa valeur absolue reste plus faible que le flux radiatif. La somme des flux illustre bien une augmentation des échanges entre la paroi du réservoir et l'environnement extérieur durant la journée.

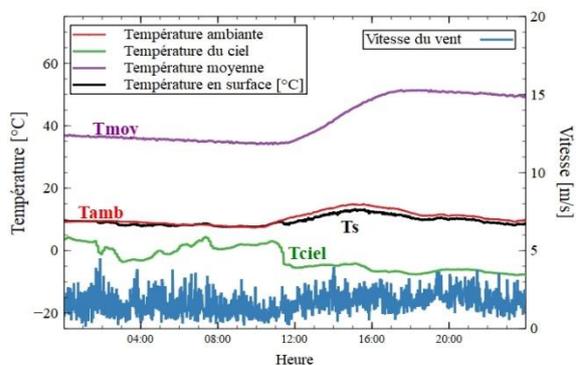


Figure 9 : : Données météorologiques de la journée du 28/11

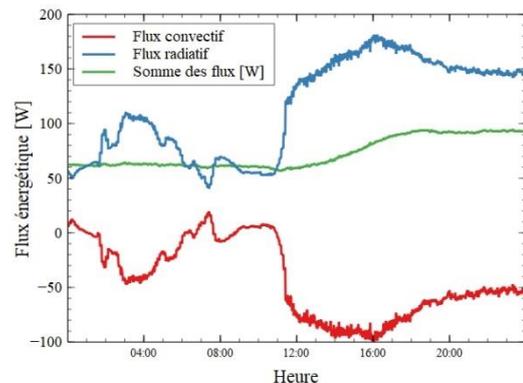


Figure 10 : Échanges convectif et radiatif du réservoir le 28/11

5. Conclusion

Ce travail a permis d'étudier le fonctionnement d'une installation solaire et plus précisément la performance d'un capteur en série. Le rendement du CSSV a pu être étudié « in situ » durant des journées de fonctionnement classique. Le principe singulier d'un capteur solaire à tubes sous vide et stockage intégré impose de prendre en compte à la fois l'énergie due à un débit massique en sortie du réservoir mais aussi l'énergie accumulée durant la période d'ensoleillement. Cette méthode de calcul a donné deux rendements de 0.46 et 0.34. Pour des mesures faites en Automne, ces valeurs sont intéressantes et montrent le potentiel d'un tel système en Europe du Nord-Ouest.

Avoir accès à des journées sans activité a donné l'opportunité d'étudier l'impact de l'environnement extérieur sur les déperditions thermiques. Le réservoir semble sensible aux échanges radiatifs avec le ciel en cas de température effective du ciel faible et d'absence de nuage.

Il semble évident que la performance globale dépend de tous les capteurs mais aussi de la combinaison de CSSV en série et en parallèle. Une prochaine étape sera d'effectuer un bilan complet sur l'ensemble de l'installation. La bonne compréhension du système va permettre de le modéliser sur des logiciels de simulation thermique dynamique. L'objectif final de la modélisation sera d'obtenir pour plusieurs régions d'Europe du Nord-Ouest les performances énergétiques des capteurs solaires pour des besoins en eau chaude différents.

Références

- [1] <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/icare4farms-increase-the-capacity-of-renewable-energies-re-in-farms-in-the-north-west-europe-region-by-using-solar-thermal-energy/> (site consultée le 26/12/2020)
- [2] Zhang, Xinyu, Shijun You, Wei Xu, Min Wang, Tao He, Xuejing Zheng. Experimental Investigation of the Higher Coefficient of Thermal Performance for Water-in-Glass Evacuated Tube Solar Water Heaters in China. *Energy Conversion and Management* 78 (février 2014): 386-92.
- [3] Indra Budihardjo, Graham L. Morrison. Performance of Water-in-Glass Evacuated Tube Solar Water Heaters. *Solar Energy* 83, n° 1 (janvier 2009): 49-56.
- [4] Graham L. Morrison, Indra Budihardjo, Masud Behnia, Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. *Solar Energy* 76, n° 1-3 (1 janvier 2004): 135-40.
- [5] Yi-Mei Liu, Kung-Ming Chung, Keh-Chin Chang, Tsong-Sheng Lee. Performance of Thermosyphon Solar Water Heaters in Series. *Energies* n°9 (septembre 2012): 3266-78.
- [6] Yogender Pal Chandra, Tomas Matuska. Stratification Analysis of Domestic Hot Water Storage Tanks: A Comprehensive Review. *Energy and Buildings* 187 (mars 2019): 110-31.
- [7] Mohammad Reza Assari, Hassan Basirat Tabrizi, Morteza Savadkoy, Numerical and Experimental Study of Inlet-Outlet Locations Effect in Horizontal Storage Tank of Solar Water Heater. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 25 (février 2018): 181-90.
- [8] ASHRAE (1993a). Handbook of Fundamental. Atlanta: ASHRAE, 8.1-8.29.

Remerciements

Ces recherches ont été effectuées dans le cadre du projet ICaRE4Farms, financé par le programme INTERREG Europe du Nord Ouest.