

Évaluation à l'échelle système de composants innovants pour les collecteurs cylindro-paraboliques

Evaluation of innovative components at the system-scale for parabolic-trough collectors

Clara DOUILLARD¹, Marianne BIERON^{1,*}

¹IMT Nord Europe, Institut Mines-Telecom, Univ. Lille, CERI Énergie Environnement, 59000 Lille, France

*(auteur correspondant : marianne.bieron@imt-nord-europe.fr)

Résumé - Cet article présente le développement, la validation et l'utilisation d'un modèle Modelica pour évaluer les composants innovants destinés à améliorer les performances des collecteurs solaires cylindro-paraboliques. De nombreux travaux scientifiques proposent des solutions telles que de nouveaux fluides, de nouvelles géométries ou encore de nouveaux revêtements de tubes absorbeurs. Ces innovations sont généralement évaluées de manière isolée. La méthode d'évaluation à l'échelle système proposée dans cet article permet d'évaluer les impacts individuels mais aussi cumulés de ces innovations dans des conditions de fonctionnement proches de celles d'un système complet.

Abstract - This article presents the development, validation, and use of a Modelica model to evaluate innovative components designed to improve the performance of parabolic trough collectors. Numerous scientific studies propose solutions such as new fluids, new geometries, and new absorber tube coatings. These innovations are generally evaluated in isolation. The system-level evaluation method proposed in this article makes it possible to evaluate the individual and cumulative impacts of these innovations under operating conditions similar to those of a complete system.

1. Introduction

La chaleur représente 45% de l'énergie finale consommée en France. Elle est aujourd'hui produite à 60% par des énergies fossiles. Face à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre du mix énergétique et de diversifier les sources d'énergie, le développement et l'amélioration des technologies solaires thermiques est stratégique. Cet article s'intéresse en particulier aux collecteurs solaires cylindro-paraboliques (PTC). De nombreux travaux scientifiques cherchent à améliorer leurs performances en développant de nouveaux fluides [1], de nouvelles géométries de tubes [2] ou encore de nouveaux revêtements de tubes [3]. Ces recherches, réalisées souvent à l'échelle du composant, permettent difficilement d'évaluer l'impact de ces améliorations une fois le collecteur intégré à un système complet [4]. De plus, l'impact cumulé des différents types d'améliorations des composants n'est jamais analysé. L'objectif de cette étude est donc d'évaluer les performances de ces collecteurs à l'aide de la simulation à l'échelle système pour différents types d'améliorations (géométrie, revêtement du tube absorbeur et huile thermique). La méthode d'évaluation à l'échelle système proposée dans cet article permet d'évaluer les impacts individuels mais aussi cumulés de ces innovations dans des conditions de fonctionnement proches de celles d'un système complet. La première partie de l'article présente le développement et la validation du modèle Modelica de collecteur cylindro-parabolique avec Dymola. La seconde partie présente la méthode proposée pour

l'évaluation à l'échelle systèmes des composants innovants pour les collecteurs cylindro-paraboliques. La troisième partie de cet article présente les résultats obtenus.

2. Développement et validation du modèle de collecteurs cylindro-paraboliques

2.1. Modélisation du collecteur cylindro-parabolique

Pour cette étude, le logiciel de simulation système Dymola [5], basé sur le langage Modelica, a été utilisé afin de créer une bibliothèque de composants permettant de modéliser les différents composants des collecteurs PTC et leurs améliorations. Le modèle de collecteur cylindro-parabolique, représenté par la figure 1, s'appuie sur les composants de la Modelica Standard Library [5], et a été adapté du modèle de Forristal [6], auquel ont été ajoutées des capacités thermiques au niveau du tube absorbeur et de l'enveloppe en verre.

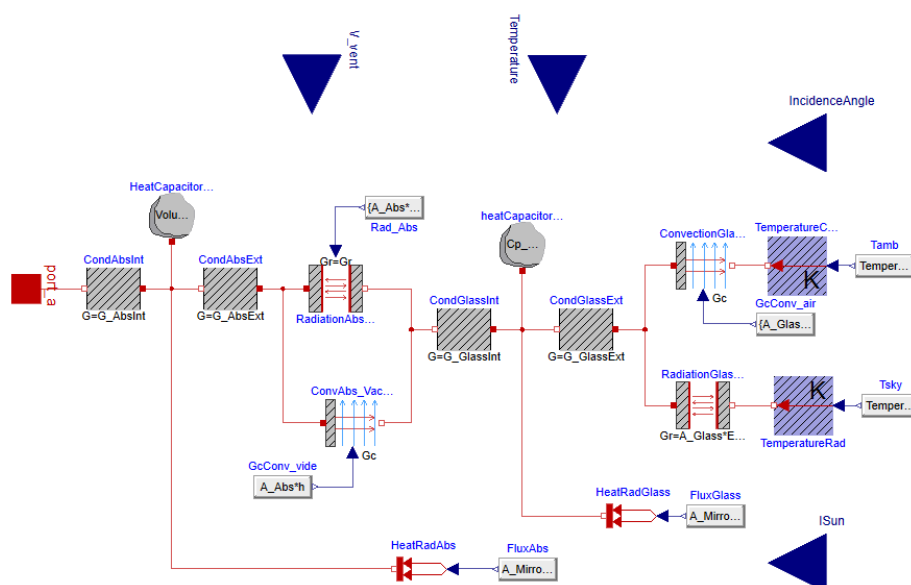


Figure 1 : *Modèle Modelica du collecteur cylindro-parabolique (composants issus de la Modelica standard library)*

Le modèle du collecteur cylindro-parabolique a été paramétré afin de correspondre au modèle Schott HCE PTR 70 dont les caractéristiques figurent dans le tableau 1 :

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
Longueur collecteur	4,06 m	Absorptance verre	0,02
Aperture	5 m	Absorptance absorbeur	0,97
Épaisseur verre	0,005 m	Émissivité verre	0,89
Diamètre verre	0,125m	Conductivité verre	1,04 W/m.K
Diamètre absorbeur (ext)	0,07m	Conductivité absorbeur	20W/m.K
Diamètre absorbeur (int)	0,066m	Coefficient Convection sous vide	0,0001115W/m².K
Masse volumique verre	2230 kg/m³	Capacité thermique verre	830J/K.kg
Masse volumique absorbeur	8000 kg/m³	Capacité thermique absorbeur	500J/K.kg
Réflectivité miroir	1	Réflectance	0,935
Transmissivité	0,97	Erreurs ombres	1
Erreurs Tracking soleil	1	Erreurs géométrie	0,98
Autres erreurs	0,96	Angle incidence	0°

Tableau 1 : *Propriétés du collecteur cylindro-parabolique modélisé*

2.2. Modélisation du fluide caloporteur

Les collecteurs solaires cylindro-paraboliques utilisent des fluides caloporteurs avec une capacité thermique élevée afin d'atteindre des températures élevées permettant ainsi de répondre au mieux aux besoins de chaleur. Afin d'assurer des échanges de chaleur entre le tube absorbeur et le fluide caloporteur, il faut également s'assurer que le fluide reste liquide à la température de travail. Une solution est l'utilisation d'huiles thermiques dans ce type de collecteur. Ce type de fluide n'est pas inclus dans la Modelica Standard Library. Il a donc fallu ajouter les fluides nécessaires à l'intégration système de collecteurs cylindro-paraboliques. Le package Medium de la Modelica standard Library recense tous les fluides utilisables avec les composants des packages standards. Les nouveaux fluides ont été implémentés en utilisant le modèle de base pour les fluides incompressibles qui se base sur des tables de propriétés thermodynamiques Media/Incompressible/TableBased). Ce modèle nécessite d'indiquer pour une plage de températures préalablement renseignée la viscosité dynamique en Pa.s, la capacité thermique en J/kg.m, la masse volumique en kg/m³, la conductivité thermique en W/m.K et la pression de vapeur en Pa. Dans le cadre de cet article, seul le nouveau fluide modélisé correspondant au Syltherm800 [7] a été utilisé.

2.3. Validation

Une fois les différents composants et le modèle de collecteur créés, il a été nécessaire de les valider en vérifiant que leurs comportements sont réalistes. Deux jeux de données expérimentaux publiés par la NREL ont été utilisés pour cela :

- Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver de NREL datant de 2008 [8] : il s'agit d'une validation des pertes thermiques sur banc d'essai en intérieur en testant uniquement le tube absorbeur et l'enveloppe en verre avec vide d'air entre les deux surfaces. La modélisation numérique de cette expérimentation est schématisée figure 2a.
- Final Test Results Schott HCE on a LS-2 Collector de Sandia National Laboratories datant de 2005 [9] : Il s'agit d'un jeu de données d'essais en conditions extérieures avec des collecteurs complets permettant une validation système du modèle développé schématisée figure 2b.

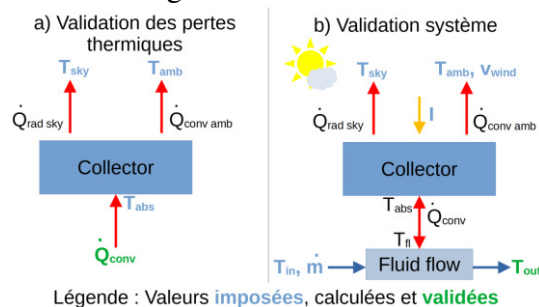


Figure 2 : Représentation schématique de la validation des pertes thermiques et système

L'utilisation de ces deux jeux de mesures permet une validation relativement complète puisqu'on valide en premier lieu uniquement l'efficacité thermique du tube absorbeur et de l'enveloppe en verre puis le collecteur en entier. Les deux expérimentations sont relativement datées (2005 et 2008) cependant, si les revêtements des tubes absorbeurs ont pu être améliorés depuis ces expérimentations, le principe général de la technologie est resté identique et ces résultats expérimentaux demeurent fiables pour la validation du modèle physique et des paramètres choisis. Il serait néanmoins intéressant de compléter ces validations par des données dynamiques. En effet, les deux jeux de données utilisés correspondent à des points de validation statiques (systèmes à l'équilibre), et il serait intéressant de confronter le modèle à des jeux de données dynamiques (données permettant de suivre l'évolution du système dans le temps).

2.3.1. Validation des pertes thermiques du tube

Cette expérimentation permet d'évaluer les pertes thermiques au niveau du tube absorbeur et de l'enveloppe en verre des collecteurs solaires cylindro-paraboliques. Pour cela, en laboratoire, différentes températures sont successivement imposées à la paroi intérieure du tube absorbeur à l'aide d'une cartouche chauffante placée à l'intérieur de celui-ci. Pour chaque niveau de température imposé au tube absorbeur, la puissance à fournir pour maintenir la température de la paroi intérieure du tube absorbeur, la température de l'enveloppe en verre et la température ambiante du laboratoire sont relevées. Le laboratoire a une température ambiante entre 23-25°C. Afin de valider la modélisation des pertes thermiques, l'expérimentation a été reproduite sous forme de simulation. Dans ce modèle, il a été considéré qu'à l'intérieur du laboratoire, il n'y avait aucun rayonnement solaire et pas de vent. Afin de simuler les pertes thermiques sur Dymola, il a été imposé au modèle de collecteur une température au niveau du port thermique qui relie habituellement la couche supérieure du fluide et la surface intérieure de l'absorbeur et la puissance calculée sur le nœud a été relevée. Les résultats des simulations avec Dymola ainsi que les données expérimentales sont représentés dans la figure 3. Il est indiqué dans le rapport de l'expérimentation que l'incertitude de mesure pour les pertes thermiques est de 10 W/m. On peut constater que l'erreur entre les données simulées et modélisées est inférieure à 10 W/m. On peut donc considérer que le modèle est valide en ce qui concerne les pertes thermiques.

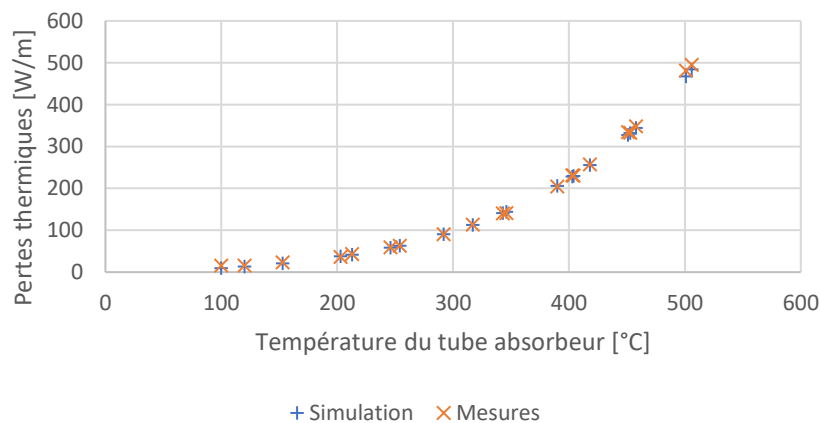


Figure 3 : Validation des pertes thermiques avec Dymola en utilisant les données de [8]

2.3.2. Validation système du collecteur cylindro-parabolique

Cet essai, effectué en 2005, a pour objectif d'estimer en conditions réelles l'efficacité énergétique du collecteur en utilisant un fluide caloporteur (Syltherm 800). Pour cela, deux collecteurs cylindro-paraboliques Schott PTR 70 ont été installés en série. L'orientation du collecteur cylindro-parabolique est contrôlée de manière à concentrer sur les tubes absorbeurs un rayonnement d'environ 1000 W/m². Le rapport de l'expérimentation renseigne les différentes températures en entrée et en sortie, l'irradiation solaire exacte, la température ambiante, la vitesse du vent ainsi que le débit de l'huile thermique. Le modèle développé de collecteur cylindro-parabolique a été validé en calculant la température du fluide caloporteur en sortie en fonction des autres paramètres renseignés pour l'expérimentation. Les résultats de cette comparaison (différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur simulées et mesurées et erreur relative entre le modèle et la simulation) sont représentés dans la figure 4.

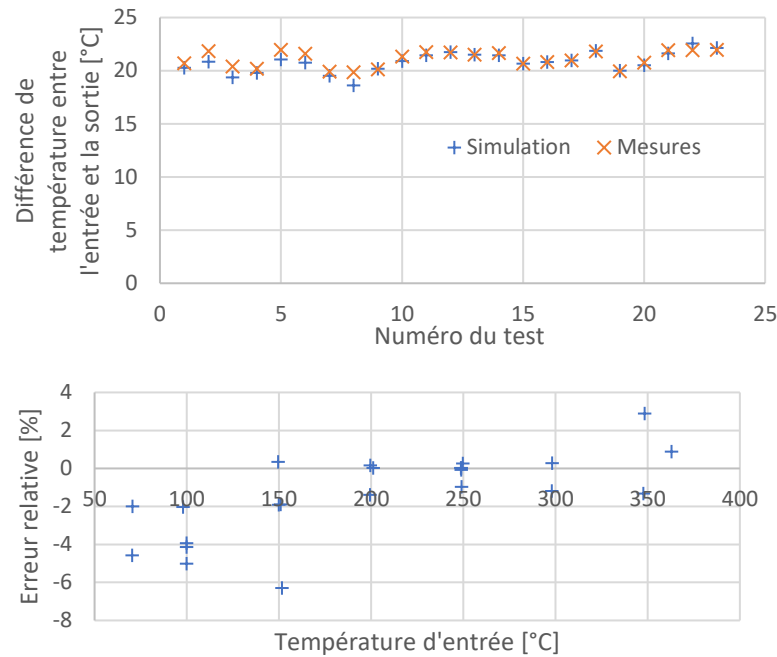


Figure 4 : Différence de température entre l'entrée et la sortie pour l'expérimentation (en orange) et le modèle (en bleu) et erreur relative en fonction de la température d'entrée du fluide

3. Évaluation à l'échelle système des composants innovants

3.1. Modélisation des améliorations apportées aux composants

3.1.1. Modification de la géométrie des tubes absorbeurs

Afin de pouvoir facilement implémenter des variantes de géométrie du tube absorbeur, il a été nécessaire de développer un nouveau modèle de tube avec des échanges thermiques le long de la paroi. Ainsi, l'écoulement de l'huile thermique dans le tube absorbeur et les échanges de chaleur entre l'huile et la surface intérieure du tube ont été modélisés en utilisant les équations de conservation de la masse et de l'énergie, de transfert par convection (dépendant du coefficient de convection) et les équations de pertes de charge (Darcy-Weisbach) dépendant d'un coefficient de friction.

L'étude qui a été menée s'est uniquement intéressée au cas des déformations de la paroi interne du tube absorbeur. D'autres modifications seraient à prendre en compte pour intégrer des déformations sur la paroi extérieure ou l'ajout d'inserts. Pour intégrer de nouvelles géométries, il est nécessaire de définir au préalable à l'aide de modélisation CFD le nouveau coefficient de convection h (ou bien le nombre de Nusselt), le coefficient de friction qui permet de calculer les nouvelles pertes de charges le long du tube, le périmètre interne moyen du tube ainsi que la nouvelle surface d'échanges. À part le coefficient de friction, ces paramètres permettent d'améliorer les échanges thermiques le long de la paroi intérieure du tube et ainsi d'améliorer l'efficacité thermique du collecteur. A terme, l'objectif du modèle proposé ici est d'intégrer dans des systèmes complets des résultats de modèle CFD de composants améliorés. Pour cet article, les résultats des simulations CFD du projet n'étant pas encore disponibles, la nouvelle géométrie de tube absorbeur étudiée est issue des travaux de Byiringiro et al. [10] car ils comportent un grand nombre de données et de courbes exploitables. Dans cet article, les chercheurs ont testé 3 nouvelles géométries et ont simulé le comportement du Syltherm 800 et d'un mélange de nanofluide/Syltherm 800 pour quatre températures d'huile thermique en entrée du tube différentes. Cette étude a montré que certaines des géométries apportaient des améliorations au niveau du Nusselt, et donc de la convection du fluide. Pour cet article, la

première géométrie proposée par Byiringiro et al. a été car cette dernière malgré un rendement thermique inférieur à la troisième configuration proposée offrait un PEC (performance evaluation criterion) similaire pour un ajout de matière au niveau du tube absorbeur similaire.

3.1.2. Fluides innovants

Pour implémenter de nouveaux fluides, il est nécessaire, comme dans le cas du Syltherm 800, de connaître la viscosité dynamique en Pa/s, la capacité thermique en J/kg.m, la masse volumique en kg/m³, la conductivité thermique en W/m.K et la pression de vapeur en Pa du nouveau fluide, en fonction d'une large plage de température. Pour cet article, il n'a pas été possible, faute de temps, d'évaluer l'impact de l'amélioration des fluides ; cependant, cela fait partie des perspectives pour le projet.

3.1.3. Nouveaux revêtements pour les tubes absorbeurs

Le revêtement des tubes absorbeurs est représenté par son émissivité et son absorptivité. L'augmentation de l'absorptivité du revêtement permet d'améliorer l'efficacité optique du collecteur en absorbant une plus grande part du rayonnement solaire. La diminution de l'émissivité du revêtement permet de diminuer les échanges radiatifs du tube absorbeur vers l'enveloppe en verre et donc d'améliorer l'efficacité thermique du collecteur. Dans le cadre de cet article, des valeurs fixes sont ajoutées ou retirées à l'émissivité et à l'absorptivité du collecteur de base.

3.2. Méthode d'évaluation à l'échelle système

Plusieurs simulations en conditions réelles avec différentes géométries ont été effectuées afin de comparer les améliorations par rapport au collecteur « classique ». Pour cela, un système intégrant un collecteur cylindro-parabolique a été modélisé afin de par la suite les intégrer à des systèmes complets permettant par exemple la production d'électricité (eau à 400°C) ou l'alimentation d'un réseau de chaleur urbain (eau à 80°C). Le système est simulé pour le mois de juin 2024 à Calais. Pour cette étude, une version simplifiée du système a été modélisée. La température d'entrée du collecteur est fixe ainsi que la température de consigne pour la sortie du collecteur. Un contrôleur PID permet de réguler le débit du fluide traversant le tube absorbeur pour obtenir une augmentation de 5°C de la température du fluide à la sortie du collecteur par rapport à l'entrée. Dans un système plus réaliste, plusieurs collecteurs cylindro-paraboliques seraient connectés en série. Le système modélisé et son pilotage sont représentés dans la figure 5 ci-dessous.

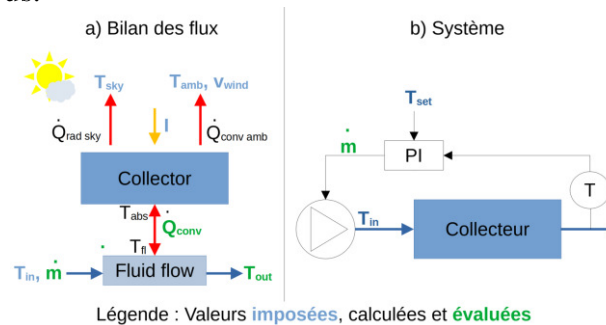


Figure 5 : Schéma de l'étude système du collecteur cylindro-parabolique et son pilotage

4. Résultats

4.1. Cas de référence

La figure 6 représente l'évolution de la température de l'huile thermique en sortie du collecteur, le débit massique de l'huile ainsi que la chaleur transmise au fluide en fonction du

temps. Il s'agit de la configuration de base du collecteur cylindro-parabolique en considérant une température de 380K pour le fluide à l'entrée du collecteur. Le système a également été simulé pour une température de l'huile thermique en entrée du collecteur à 440K qui correspond aux bornes inférieures et supérieures des températures testées dans l'article utilisé comme référence pour la nouvelle géométrie de tube absorbeur.

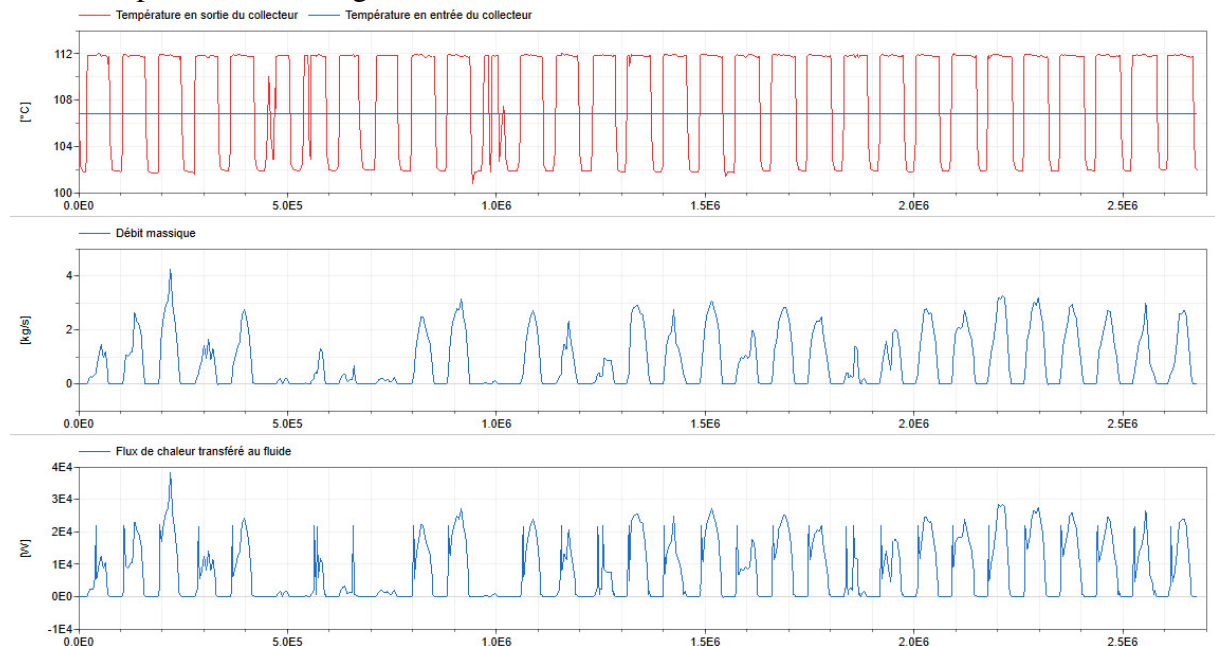


Figure 6 : Résultat du cas de base pour l'analyse système des collecteurs cylindro-paraboliques

4.2. Analyse paramétrique des composants innovants

Dans le cadre de cette étude, seulement trois améliorations du collecteur ont été testées :

- Modification de la surface intérieure du tube absorbeur : le cylindre de base a été remplacé par la configuration 1 (5 ailettes de 4 mm d'épaisseur et d'une hauteur variant entre 6 et 20 mm positionnées sur la surface intérieure du tube absorbeur) des travaux de Byiringiro et al. [10]
- Augmentation de l'absorptivité de 0.01
- Diminution de l'émissivité de 0.01.

Enfin, ces trois améliorations ont été testées simultanément. Les résultats figurent dans le tableau 2 ci-dessous pour les deux températures d'entrée testées (380K et 440K). La première colonne indique l'énergie transmise au fluide au cours du mois, la seconde, efficacité énergétique du collecteur. Au regard de la géométrie choisie et de l'écart d'absorptivité choisi, il semblerait que l'amélioration du revêtement ait un impact plus important sur les performances du collecteur. Cependant, il faudrait prendre en compte d'autres géométries et étudier davantage la latitude d'amélioration possible pour les revêtements. Il faut de plus noter que ces résultats comparent uniquement l'amélioration des propriétés thermiques à l'échelle du collecteur cylindro-parabolique et ne prennent donc pas en compte le surplus de consommation énergétique au niveau de la pompe dû à l'augmentation du coefficient de friction dans le tube absorbeur.

On peut également voir que la température de l'huile thermique a peu d'impact sur l'amélioration de l'efficacité énergétique du collecteur. Cependant, il serait intéressant de vérifier la sensibilité de ces résultats pour une gamme plus large de températures d'entrée du fluide. Enfin, en considérant simultanément tous les types d'amélioration testés, l'amélioration globale de l'efficacité énergétique est autour de 1,3 %. Ce résultat est cohérent avec les rendements déjà importants de ce type de collecteur. Cependant, il faudrait vérifier l'impact de

l'incertitude de mesure des paramètres représentatifs de l'amélioration des composants (absorptivité et émissivité du revêtement, Nusselt et coefficient de friction du tube absorbeur et propriétés du fluide) sur les résultats de la simulation pour s'assurer de l'effectivité de l'amélioration du rendement simulée.

	<i>Tin : 380K</i>		<i>Tin : 440 K</i>	
	<i>E</i>	<i>Rendement</i>	<i>E</i>	<i>Rendement</i>
	kWh	%	kWh	%
Cas de base	5264,7	77,5	5240	77,1
Géométrie	5292,9	77,9	5267,3	77,5
Absorptivité	5320,7	78,3	5295,8	77,9
Emissivité	5275,4	77,6	5255,8	77,3
Tout	5356,8	78,8	5334,3	78,5

Tableau 2 : *Impact des améliorations du tube absorbeur des collecteurs cylindro-paraboliques*

5. Conclusion

Cet article propose une méthode pour évaluer à l'échelle système des composants innovants pour les collecteurs cylindro-paraboliques. Un modèle de collecteur cylindro-parabolique a été développé et validé à l'aide de données expérimentales. Des modifications de la géométrie des tubes absorbeurs et de leur revêtement ont été modélisées. Un système intégrant un collecteur cylindro-parabolique ainsi que les différents composants innovants a été modélisé afin d'évaluer l'impact des différentes modifications. La modification de la géométrie des tubes absorbeurs semble avoir peu d'impact. Il faudrait tester d'autres géométries innovantes pour espérer améliorer le rendement du système. La modification du revêtement du tube absorbeur semble plus efficace puisqu'elle permet d'améliorer à la fois les rendements thermiques et optiques du système. De futurs travaux procéderont à une analyse de sensibilité afin de déterminer plus précisément les améliorations à privilégier.

Références

- [1] Byiringiro, J., Chaanaoui, M., & Hammouti, B. (2025). Enhancement of thermal performance in parabolic trough solar Collectors: Investigation of three novel receiver configurations using advanced heat transfer fluids. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 293, 113833.
- [2] Bellos, E., Tzivanidis, C., & Tsimpoukis, D. (2017). Thermal enhancement of parabolic trough collector with internally finned absorbers. *Solar energy*, 157, 514-531.
- [3] Noč, L., & Jerman, I. (2022). Review of the spectrally selective (CSP) absorber coatings, suitable for use in SHIP. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 238, 111625.
- [4] Manikandan, G. K., Iniyan, S., & Goic, R. (2019). Enhancing the optical and thermal efficiency of a parabolic trough collector—A review. *Applied energy*, 235, 1524-1540.
- [5] Modelica Standard Library <https://github.com/modelica/ModelicaStandardLibrary>
- [6] Forristall, R. (2003). Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. <https://doi.org/10.2172/15004820>
- [7] SYLTHERM™ 800 Stabilized Heat Transfer Fluid Technical Data Sheet <https://www.dow.com/en-us/documentviewer.html?docPath=/content/dam/dcc/documents/176/176-01469-01-syltherm-800-stabilized-heat-transfer-fluid.pdf>
- [8] Moss, T., & Brosseau, D. (2005). Final test results for the Schott HCE on a LS-2 collector. <https://doi.org/10.2172/958386>
- [9] Burkholder, F., & Kutscher, C. (2009). Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver. <https://doi.org/10.2172/1369635>
- [10] Byiringiro, J., Chaanaoui, M., & Halimi, M. (2024). Heat transfer enhancement of a parabolic trough solar collector using innovative receiver configurations combined with a hybrid nanofluid: CFD analysis. *Renewable Energy*, 233, 121169. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121169>

Remerciements

Les autrices souhaitent exprimer leur gratitude à Aimad Koulali, Pascale Bouvier et Serge Russeil pour les nombreux échanges que nous avons eus dans le cadre de ce projet.