

Modélisation dynamique des transferts de chaleur au sein d'un récepteur linéaire de Fresnel : application d'une régulation lors de passages nuageux

Emeric TAPACHES^{1*}, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES¹, Franck LUCAS¹, Jean-Jacques BEZIAN², François VEYNANDT², Michel PONS³

¹ Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie et l'Environnement (PIMENT)
40, avenue de Soweto – BP 373 – 97455 Saint Pierre CEDEX – Ile de la Réunion

² Centre de Recherche d'Albi en génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Énergie et de l'Environnement (RAPSODEE), UMR CNRS 5302.

Ecole des Mines d'Albi, Campus Jarlard – 81013 Albi

³ Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI), UPR CNRS 3251. B.P. 133 – 91403 Orsay CEDEX

* (auteur correspondant : emeric.tapaches@univ-reunion.fr)

Résumé

L'utilisation des concentrateurs solaires linéaires de Fresnel pour la production d'électricité par centrale thermodynamique est une solution de plus en plus attractive. Néanmoins, le comportement dynamique et les bonnes stratégies de contrôle pour cette technologie demandent encore à être étudiées. Cet article présente le développement d'un modèle dynamique de ce capteur couplant : 1/ un code simulant la concentration optique ; 2/ un code simulant les transferts thermiques au sein du récepteur linéaire. Ensuite, une simulation du comportement d'un capteur linéaire de Fresnel sur une journée avec quelques passages nuageux est présentée.

Nomenclature

c_p	capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
D	diamètre intérieur du tube, m
DNI	rayonnement solaire direct, $W.m^{-2}$
GHI	rayonnement global horizontal, $W.m^{-2}$
h	enthalpie, $J.kg^{-1}$
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
L	longueur du récepteur, m
M	masse, kg
\dot{Q}	flux thermique, W
T	température, K , u vitesse axiale, $m.s^{-1}$
δt	pas de temps du code thermique, s

Symboles grecs

ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$

Indices et exposants

cv	convection
cd	conduction
cs	consigne de régulation
ex	extrapolation
f	fluide caloporteur
in	entrée récepteur
out	sortie récepteur
rad	rayonnement
sol	solaire
t	tube absorbeur

1. Introduction

La filière solaire thermodynamique à concentration est une des voies possibles pour la production d'électricité. Parmi les capteurs solaires utilisés dans cette filière, la technologie linéaire de Fresnel connaît un intérêt grandissant du fait de son compromis attractif entre performance, simplicité de mise en œuvre et coût. Un état de l'art complet sur cette technologie a récemment été publié [1].

Si le dimensionnement de très grandes installations basé sur des puissances moyennées ne pose plus de difficultés particulières en termes de recherche, la maîtrise des conséquences des transitoires est toujours un point crucial : il faut d'un côté éviter des surchauffes locales qui

dégraderaient prématurément le fluide caloporteur ou les éléments du récepteur et de l'autre maximiser l'énergie captée en adoptant des procédures de conduite aussi efficaces que possible tout en respectant des consignes de fonctionnement telles que la température de sortie du fluide caloporteur. Les sollicitations transitoires les plus contraignantes sont les phases de démarrage et d'arrêt ainsi que les passages nuageux. Afin d'étudier numériquement l'influence de ces sollicitations, un modèle dynamique de récepteur linéaire a été développé par PIMENT et le LIMS. Ce modèle thermique a été couplé à un code simulant les aspects optiques de la concentration et développé par l'équipe RAPSODEE.

Plusieurs articles de la littérature présentent des simulations dynamiques et des procédures de contrôle pour des centrales cylindro-paraboliques [2-5], mais à notre connaissance aucun ne traite de cette problématique pour des capteurs linéaires de Fresnel.

Dans cet article, nous faisons tout d'abord une brève description du capteur linéaire de Fresnel étudié. Puis, nous présentons les principes de fonctionnement du modèle dynamique décrivant ce capteur. Ensuite, nous présentons les résultats d'une simulation réalisée sur une journée ensoleillée avec deux passages nuageux. Les procédures de contrôles mises en place pour cette journée sont également détaillées. Pour finir, nous présentons les conclusions de cette étude et les perspectives qu'elle ouvre.

2. Description du capteur étudié

Pour cette étude, nous nous sommes intéressés à un capteur linéaire de Fresnel constitué de 14 lignes de miroirs. Chacune de ces lignes est constituée d'un alignement de 12 miroirs légèrement courbés de façon cylindrique afin d'augmenter le facteur de concentration du capteur. Ces miroirs mesurent tous quatre mètres de long et un mètre de large. Leur disposition représente un champ d'environ 20 mètres de large. Les lignes de miroir sont alignées dans le sens nord-sud et elles sont motorisées autour de cet axe afin de réfléchir continuellement le rayonnement solaire direct (DNI) sur le récepteur linéaire placé à huit mètres au-dessus du champ de miroirs.

Le récepteur linéaire (Figure 1 à gauche) est composé d'un concentrateur parabolique composé (CPC) qui augmente le facteur de concentration sur le tube absorbeur, et d'un vitrage qui ferme l'ensemble en face avant en délimitant une cavité d'air. Le fluide caloporteur circulant dans le tube est la même huile de synthèse que celle utilisée dans la centrale à cylindro-paraboliques de Saguaro en Arizona (XCEL THERM®600, Radco Ind.). Le réflecteur est entouré d'isolant thermique. De part et d'autre du vitrage, des réflecteurs latéraux limitent le flux absorbé par l'isolant. Le récepteur linéaire de 50 mètres de long est supporté par quatre poteaux régulièrement espacés, équipés de réflecteurs transversaux pour protéger les points d'appui du récepteur sur ces poteaux.

3. Modèle numérique

Nos simulations numériques reposent sur deux codes, un premier code simulant la concentration du rayonnement solaire et un second code, baptisé SOLIFRE (SOlar LInear Fresnel REceptor), simulant les transferts thermiques au sein du récepteur linéaire.

3.1. Le modèle optique

Ce modèle calcule, en fonction de la géométrie du capteur, de la position du soleil dans le ciel et de l'intensité du DNI, la distribution des flux solaires absorbés par les différents éléments du récepteur après toutes les réflexions possibles sur les autres éléments. Le code initial avait été développé par F. Veynandt en C++ sous EDStar pour le capteur de Fresnel testé à Albi [6]. L'environnement de développement EDStar, créé par l'équipe STARWest, est dédié à la

simulation de transports corpusculaires soumis à des contraintes de parcours ; il permet premièrement de modéliser toute la géométrie du capteur solaire à l'aide de la bibliothèque de synthèse d'image PBRT (cf. Figure 1 à droite) où chaque objet géométrique est caractérisé par ses propriétés optiques, et deuxièmement d'effectuer des calculs parallèles à base d'algorithmes de lancers de rayons par méthode Monte Carlo et ainsi d'estimer les distributions de densité de flux recherchées ainsi que les divers facteurs de forme. Cet environnement et ses possibilités ont récemment été décrits en détail [7].

Le code de F. Veynandt a été modifié pour que la discrétisation du récepteur décrit en Section 2 puisse être affinée, en accord avec celle choisie dans le code thermique et pour mettre en place une méthode de simulation annuelle. La Figure 2 présente une carte du facteur de concentration optique (rapport de la densité de flux absorbée localement au DNI) le long du tube absorbeur (soleil au zénith).

Un calcul EDStar pour une position du soleil étant relativement lourd, il est important de découpler le pas de temps des calculs optiques de celui, beaucoup plus court, requis pour les calculs thermiques. Une méthode de simulation particulière a été mise en place dont le principe est de réaliser ces calculs optiques au préalable et uniquement sur les nœuds d'un maillage (déclinaison - angle solaire) couvrant la portion de ciel balayée par le soleil le long de l'année. Ensuite, la carte des flux solaires absorbés à un instant donné sera obtenue par interpolation entre ces calculs optiques préliminaires. Nous avons évalué la précision de cette méthode d'interpolation par rapport à une série de calculs directs avec EDStar. En utilisant un maillage avec une résolution de 1.5° sur la déclinaison et de 3° sur l'angle horaire ; et en simulant l'évolution du flux absorbé par le tube sur une journée, nous avons pu vérifier que l'erreur quadratique moyenne relative ne dépasse pas le pourcent.

Ce code optique offre encore des perspectives d'amélioration, notamment la simulation du déplacement des nuages au-dessus du capteur et son influence sur la répartition du DNI.

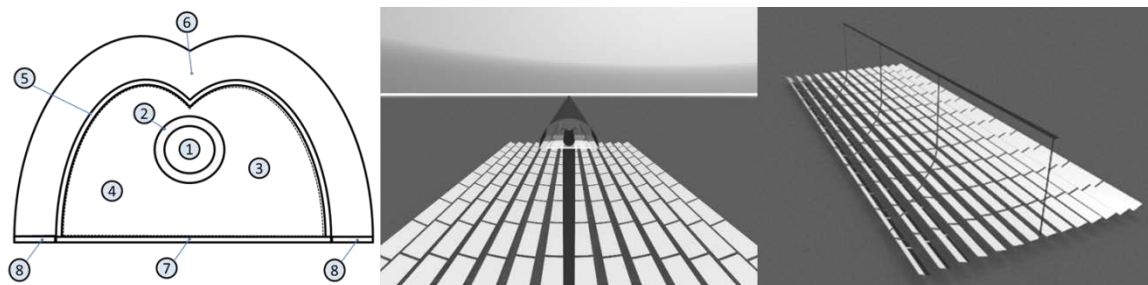


Figure 1 : À gauche, section transversale du récepteur linéaire avec (1) fluide, (2) tube absorbeur, (3) cavité d'air, (4) réflecteur transversal, (5) réflecteur secondaire, (6) isolant, (7) vitrage et (8) réflecteurs latéraux. À droite, modélisation du capteur sous EDStar

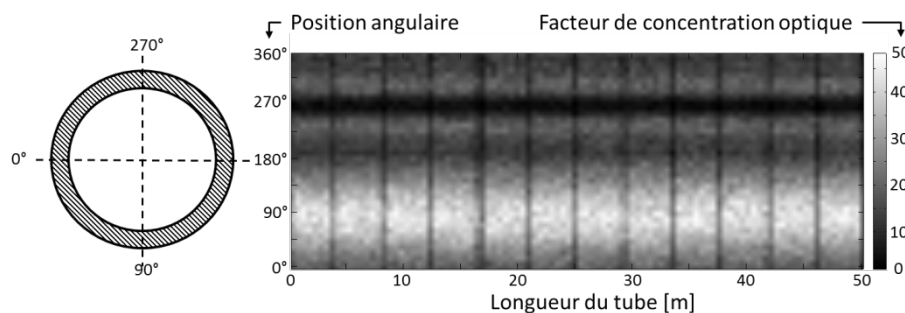


Figure 2 : Distribution du facteur de concentration optique sur le tube absorbeur

3.2. Le modèle thermique

Ce modèle thermique calcule les champs de températures des éléments du récepteur et le devenir du flux solaire absorbé, soit transmis au fluide caloporteur, soit dissipé vers l'extérieur. L'approche par volumes finis a été adoptée. Les éléments constitutifs du récepteur linéaire ont été subdivisés en volumes de contrôle discrets. La Figure 3 montre une discrétisation possible du récepteur.

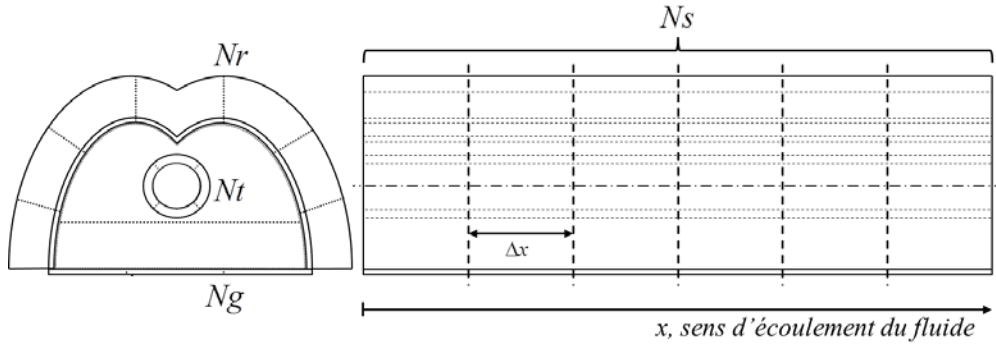


Figure 3 : Subdivision du récepteur linéaire en plusieurs volumes de contrôle

Le maillage longitudinal du récepteur est régulier. Une maille longitudinale, de l'isolant, du réflecteur secondaire, du tube ou du vitrage, peut aussi être divisée transversalement.

Le modèle thermique simule en instationnaire les transferts suivants : 1/ entre éléments de la cavité (tube, réflecteur, vitrage), par radiation infrarouge et par convection et conduction dans l'air contenu dans la cavité ; 2/ à l'intérieur de chaque élément par conduction, transversalement et longitudinalement et 3/ par dissipation à travers le vitrage ou l'isolant vers l'air extérieur, c.-à-d. conduction puis transfert radiatif plus convectif vers l'air. Températures extérieures, vitesses de vent et rayonnements solaires ont été obtenus à partir des relevés météorologiques effectués à l'IUT de St-Pierre de La Réunion (lat. : 21.3405° Sud ; long. : 55.4900° E).

L'écoulement du fluide est turbulent, ce qui permet de considérer que la température T_f et la vitesse u du fluide ne dépendent que de la position axiale x . Le problème radiatif, résolu par la méthode des radiosités, est fortement non-linéaire (termes en T^4) ce qui impose une résolution par itérations successives. La méthode itérative utilisée est celle de Newton-Raphson. La particularité du code est qu'il profite de cette procédure itérative pour ajuster en fonction des conditions locales les grandeurs ou paramètres physiques suivant : propriétés thermophysiques du fluide caloporteur, vitesse du fluide (cf. eq. (1)), coefficients d'échange entre le tube et le fluide (cf. eq. (2)) et dans la cavité.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u h}{\partial x} = \frac{U(\bar{T}_t - T_f)}{D/4} \quad (2)$$

où ρ est fonction de la température locale $T_f(x)$ et l'enthalpie h du fluide définie par : $dh = c_{pf}(T).dT$. Le coefficient d'échange tube-fluide local U est évalué par la formule de Colburn $U = (k/D) \cdot (0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3})$ dans laquelle le Reynolds et le Prandtl sont évalués localement. \bar{T}_t est la température moyenne de la paroi intérieure du tube et $D/4$ est le rapport de la section au périmètre.

Chaque maille solide est traitée comme un seul volume de contrôle échangeant des flux thermiques avec ses éléments voisins (cf. éq. (3)), lesquels flux thermiques pouvant être corrélés à des gradients de température internes.

$$Mc_p \frac{dT}{dt} - \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{cv} - \dot{Q}_{cd,trans} = \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{cd,long} \quad (3)$$

Ce modèle tient compte des transferts radiatifs et convectifs (resp. \dot{Q}_{rad} et \dot{Q}_{cv}), avec l'extérieur (pour le vitrage et l'isolant) ou à travers la cavité interne (pour le tube, le réflecteur et le vitrage), et des transferts conductifs. La conduction transverse entre éléments en contact $\dot{Q}_{cd,trans}$ est traitée implicitement (membre de gauche). \dot{Q}_{sol} , le flux solaire absorbé localement est donné par les calculs optiques. La résolution itérative imposée par le problème radiatif permet d'intégrer au modèle la conduction longitudinale $\dot{Q}_{cd,long}$ (explicitée, membre de droite), des c_p éventuellement fonction de la température, des coefficients d'échange externes dépendant de la vitesse du vent, et des coefficients d'échange internes à la cavité dépendant du Rayleigh selon les corrélations établies pour deux cylindres coaxiaux horizontaux à températures différentes [8] et qui montrent que la cavité peut être séparée en deux : une partie haute où des cellules convectives se développent, et une partie basse où l'air froid s'accumule avec des transferts purement conductifs. La séparation entre ces deux zones est située juste en dessous du point bas du tube. Le modèle SOLIFRE a été développé sous l'environnement DELPHI avec une structure de code orienté objet. Deux procédures complètent ce code. La première permet de lire les grandeurs du fichier météorologique : température de l'air ambiant, vitesse de vent, DNI et rayonnement solaire global (GHI) en fonction d'une date (la procédure interpole ces grandeurs si nécessaire). La seconde permet d'interpoler la distribution de flux absorbé à cette date à l'aide du fichier de sortie du code optique, conformément à la méthode décrite dans la section 3.1.

4. Simulations

4.1. Stratégie de commande globale et régulation des températures du fluide caloporteur à l'intérieur du récepteur

Notre stratégie de commande globale a été mise au point pour une centrale constituée d'un champ de capteurs, de deux stocks de chaleur sensible (l'un « chaud » à 500 K et l'autre « froid » à 400 K) et d'un cycle thermodynamique. Tout au long de la journée, le stock « chaud » est rempli avec du fluide caloporteur chauffé jusqu'à sa température de consigne (500 K). Si la température de consigne est atteinte en sortie du capteur, alors le fluide est dirigé vers le stock « chaud », sinon il est dirigé vers le stock « froid ». En fin de journée, le stock « chaud » et l'ambiant (air ou eau) servent à faire fonctionner la machine thermodynamique et ainsi produire de l'électricité.

Afin de respecter la stratégie de commande, la procédure de régulation illustrée en Figure 4 a été codée. La vitesse d'entrée du fluide caloporteur u_{fin} est régulée afin de maintenir, autant que possible, la température de sortie au niveau de sa consigne T_{fcs} quelles que soient les perturbations (position du soleil et grandeurs météorologiques). La difficulté de cette régulation est la grande inertie du système, puisque le fluide met environ sept minutes en nominal pour

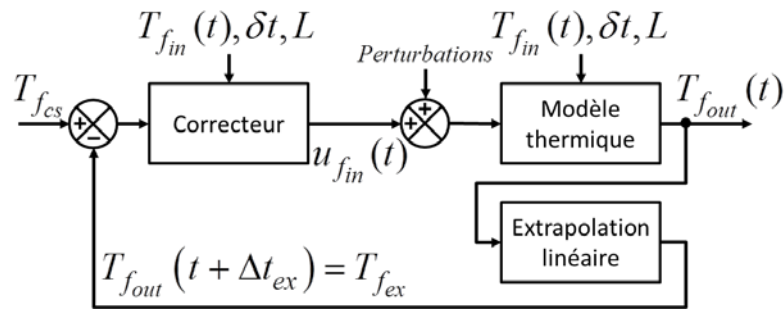


Figure 4 : Principe de la régulation

traverser toute la longueur L du récepteur : l'effet sur la température de sortie d'une variation du débit ne s'observe donc qu'avec un délai important. Par conséquent, il est nécessaire d'anticiper la valeur de la température $T_{f_{ex}}$ qu'aura le fluide en sortie, après son temps de parcours dans le récepteur $\Delta t_{ex} = L / u_{fin}$. Cette température est extrapolée linéairement à partir du calcul actuel et d'un calcul précédant de $T_{f_{out}}$ stocké en mémoire. Ensuite, le correcteur calcule la prochaine valeur de u_{fin} selon l'équation suivante :

$$u_{fin}(t + \delta t) = e^{-\alpha} \cdot u_{fin}(t) + (1 - e^{-\alpha}) \cdot u_{fin}(t) \cdot \frac{T_{f_{ex}} - T_{fin}(t)}{T_{f_{cs}} - T_{fin}(t)} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{\delta t}{\Delta t_{ex} / 2} \quad (4)$$

Cette équation traduit un amortissement de la régulation afin de tenir compte du long temps de parcours du fluide dans le récepteur. Tout au long du calcul il faut veiller à ce que la température de la paroi intérieure du tube absorbeur ne dépasse pas 590 K, température au-delà de laquelle le fluide se dégrade. Nous envisageons d'ajouter cette condition en tant que contrainte dans notre procédure de régulation.

4.2. Application du contrôle sur une journée ensoleillée avec deux passages nuageux

La journée simulée est le 21 juin 2011, journée d'hiver austral.

Procédure de contrôle lors de démarrage au matin :

À ce moment, le récepteur, qui s'est refroidi pendant la nuit, est supposé être à la température ambiante. Il faut donc le préchauffer au moment adéquat pour que le rayonnement solaire puisse être capté dès que possible. Ainsi la procédure de démarrage se met en route plusieurs minutes avant le début estimé de l'éclairement effectif du champ de miroirs. Cette estimation se fait à l'aide des calculs de la position du soleil et de la couverture nuageuse observée par l'opérateur. Le démarrage consiste en plusieurs étapes : 1/ préchauffage à débit maximal ; 2/ diminution du débit avant focalisation des miroirs ; 3/ variation du débit amortie pour s'adapter au flux solaire observé ; 4/ fonctionnement avec contrôle nominal décrit ci-dessus.

Procédure de contrôle lors d'un passage nuageux (arrêt puis reprise) :

Les passages nuageux sont plus difficiles à gérer, d'abord parce qu'ils sont par essence aléatoires, et ensuite parce que le retour du soleil provoque une augmentation très brutale du flux solaire jusqu'à de fortes valeurs. Nous n'avons pas supposé disposer de moyens sophistiqués permettant de prévoir, à échéance de la minute par exemple, le début et la fin d'un épisode nuageux. Ici, l'arrivée d'un passage nuageux (chute observable du DNI) va induire l'arrêt de la circulation du fluide et la défocalisation des miroirs. Pendant la durée du passage nuageux, le code thermique calcule le refroidissement des éléments du récepteur. Lors du

retour, le débit est d'abord faible, pour que le récepteur retrouve l'état thermique de fonctionnement nominal, puis la régulation adaptant le débit en fonction de la température de sortie se met en route.

Résultats :

Pour cette simulation, le récepteur linéaire a été discrétisé longitudinalement en 75 mailles, soit $\Delta x = 0.67m$. Pour ce premier test, le maillage transversal est limité à un seul élément respectivement pour le tube, le réflecteur (et donc l'isolant) et le vitrage. La journée simulée est une journée bien ensoleillée le matin, qui subit dans l'après-midi deux passages nuageux, un premier entre 13 h 30 et 15 h 15 et un second entre 15 h 45 et 17 h 00. La simulation commence à 7 h 42 et se termine à 17 h 18. Sur un PC équipé de 8 Go de RAM et d'un processeur Intel® Core™ i7-2640M CPU @ 2.80GHz, cette simulation dure environ 3 min en temps réel.

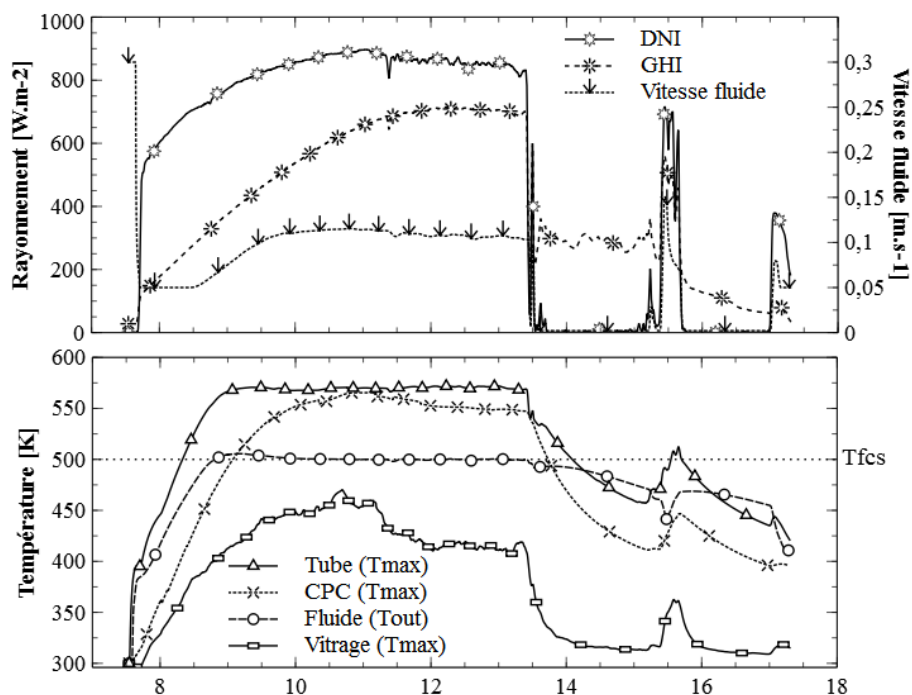


Figure 5 : Évolution des températures et de la vitesse en fonction du rayonnement solaire

Sur la Figure 5 le graphique du haut présente les évolutions du DNI, du GHI et de la vitesse du fluide caloporteur. Le graphique du bas présente les évolutions des températures maximales atteintes, le long du récepteur, par : le tube, le réflecteur secondaire, et le vitrage. Vient s'ajouter à celles-ci, la température de sortie du fluide caloporteur.

Vers 11 h 15, le DNI subit une courte baisse d'environ 70 W.m^{-2} . La procédure de régulation répercute cette baisse sur la vitesse du fluide avec un retard et en l'amortissant. Grâce à cette régulation et à l'inertie du système, cette baisse n'impacte pas les températures du fluide et du tube, ce qui est le comportement recherché. D'autre part, le vitrage étant l'élément le plus exposé au vent, l'on observe sur sa température des fluctuations dues aux variations de la vitesse du vent. Par contre, ces variations sont filtrées par l'inertie du système et n'ont visiblement pas d'effet sur la température de fluide. L'autre enseignement de cette simulation concerne le comportement du capteur vis-à-vis de l'intermittence solaire. Par exemple, le DNI incident pendant une quinzaine de minutes autour de 15 h 30 ne peut pas être converti en énergie thermique stockée. Seul un modèle dynamique permet de rendre compte de ce type de pertes d'énergie qui échapperaient à un modèle en pseudo-stationnaire. Cet outil nous permet d'étudier

le productible annuel dans des climats semblables à celui de St-Pierre, bien ensoleillé certes mais fréquemment soumis à passages nuageux successifs notamment pendant l'après-midi.

5. Conclusion

À ce stade, ce modèle dynamique permet d'étudier la gestion des transitoires à l'aide de procédures de régulation sur le débit d'entrée du fluide caloporteur. La procédure de régulation étudiée dans cet article fonctionne bien pour des passages nuageux isolés, mais il n'est plus satisfaisant pour des passages nuageux à plus haute fréquence d'apparition. Il faut donc se tourner vers des procédures plus élaborées et dans ce domaine une des perspectives intéressantes est d'utiliser des procédures basées sur des moyens de prédiction à court terme du DNI. Par contre, avant de s'engager sur cette perspective, il faudra encore valider ce modèle avec des données expérimentales. Une fois amélioré et validé, ce modèle pourra servir d'outil d'aide au dimensionnement et de mise au point de procédures de régulation.

Références

- [1] G. Zhu, T. Wendelin, M. J. Wagner et C. Kutscher, History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors, *Solar Energy*, in press-X (2014), X.
- [2] C. M. Cirre, M. Berenguel, L. Valenzuela et E. F. Camacho, Feedback linearization control for a distributed solar collector field, *Control Engineering Practice*, 15-12 (2007), 1533-1544.
- [3] M. Eck et T. Hirsch, Dynamics and control of parabolic trough collector loops with direct steam generation, *Solar Energy*, 81-2 (2007), 268-279.
- [4] F. Manenti et Z. Ravaghi-Ardebili, Dynamic simulation of concentrating solar power plant and two-tanks direct thermal energy storage, *Energy*, 55 (2013), 89-97.
- [5] K. M. Powell et T. F. Edgar, Modeling and control of a solar thermal power plant with thermal energy storage, *Chemical Engineering Science*, 71 (2012), 138-145.
- [6] F. Veynandt, *Cogénération héliothermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel : modélisation de l'ensemble du procédé*, Thèse École des Mines Albi, Albi (2011).
- [7] J. Delatorre et J. J. B. G. Baud, S. Blanco, C. Caliot, J.F. Cornet, C. Coustet, J. Dauchet, M. El Hafi, V. Eymet, R. Fournier, J. Gautrais, O. Gourmel, D. Joseph, N. Meilhac, A. Pajot, M. Paulin, P. Perez, B. Piaud, M. Roger, et al., Monte Carlo advances and concentrated solar applications, *Solar Energy*, in press-X (2014), X.
- [8] T. H. Kuehn et R. J. Goldstein, An experimental and theoretical study of natural convection in the annulus between horizontal concentric cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, 74-04 (1976), 695-719.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche SolarTherm. Les auteurs remercient la région Réunion pour le financement de ce projet et de la thèse qui lui est associée.