



**HAL**  
open science

## Modélisation et simulation dynamique de l'intégration de chaleur solaire à un procédé industriel réunionnais

Christophe Maillot, Jean Castaing-Lasvignottes, Garry Riviere, Frantz Sinama, Emeric Tapaches, Olivier Marc Marc

### ► To cite this version:

Christophe Maillot, Jean Castaing-Lasvignottes, Garry Riviere, Frantz Sinama, Emeric Tapaches, et al.. Modélisation et simulation dynamique de l'intégration de chaleur solaire à un procédé industriel réunionnais. Congrès Annuel de la Société Française de Thermique SFT 2018, May 2018, Pau, France. hal-03271003

**HAL Id: hal-03271003**

<https://hal.univ-reunion.fr/hal-03271003v1>

Submitted on 25 Jun 2021

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

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

# Modélisation et simulation dynamique de l'intégration de chaleur solaire à un procédé industriel réunionnais.

Christophe MAILLOT, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES, Garry RIVIERE, Frantz SINAMA, Emeric TAPACHES, Olivier MARC\*

Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique appliquées à l'Énergie, à l'environnement et au bâtiment (PIMENT) - Université de La Réunion : Campus de Terre-Sainte 97410 Saint Pierre.

\*(auteur correspondant : [olivier.marc@univ-reunion.fr](mailto:olivier.marc@univ-reunion.fr))

**Résumé** - Dans le secteur industriel, la part de production de chaleur d'origine solaire thermique est encore très faible, malgré l'existence de technologies de capteurs solaires proposant des niveaux de températures adaptés. Dans cette étude, nous envisageons la possibilité d'intégrer de la chaleur solaire à un cas spécifique de l'industrie réunionnaise : Sorélaït-Danone, entreprise du secteur agroalimentaire. Dans un premier temps, le fonctionnement de la production de chaleur de l'usine et sa modélisation sont décrits. Puis le modèle proposé est comparé aux données expérimentales récoltées sur site. Enfin, deux scénarios d'intégration de chaleur solaire au procédé de production de chaleur existant sont simulés afin d'estimer la quantité de fioul qui peut être économisée. Cette étude montre finalement que l'intégration de procédés de production de chaleur solaire permet des économies de près de 28% pour ce type d'industrie.

## Nomenclature

$A$	surface, m <sup>2</sup>	<i>Indices et exposants</i>
$C_p$	capacité calorifique, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	<i>amb</i> ambiant
$G$	rayonnement solaire global, W.m <sup>-2</sup>	<i>ch</i> chaudière
$h$	enthalpie massique, J.kg <sup>-1</sup>	<i>comb</i> combustion
$\dot{m}$	débit massique, kg.s <sup>-1</sup>	<i>cond</i> condensat
$M$	masse, kg	<i>e</i> entrée
$P$	pression, Pa	<i>eb</i> eau bache
$\dot{Q}$	flux thermique, W	<i>ec</i> eau chaude
$T$	température, K	<i>ef</i> eau froide
$U$	énergie interne, J	<i>ext</i> extérieur
$U_g$	coefficient d'échange global, W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>	<i>m</i> moyen
		<i>p</i> perdu
		<i>s</i> sortie
<i>Symboles grecs</i>		
$\eta$	rendement, -	
$\delta$	état du système, -	

## 1. Introduction

Dans le cadre du programme SHC (Solar Heating and Cooling) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), un état de l'art de l'utilisation de l'énergie solaire thermique dans le secteur industriel a été réalisé. Ces premiers travaux dressent le constat d'une très faible valorisation de la chaleur solaire dans ce secteur, dont les besoins en température sont pourtant compatibles avec les performances des technologies actuelles de capteurs solaires [1, 2]. Ceci peut s'expliquer par le fait que les acteurs industriels bénéficient souvent de tarifs préférentiels pour l'achat d'énergie, ce qui ne les pousse pas à investir dans des solutions solaires thermiques [3]. La deuxième phase (Tâche 49) du programme SHC consiste à centrer les travaux sur la production de chaleur et sur son intégration aux procédés industriels. Les conclusions démontrent bien le potentiel important de la chaleur solaire pour l'industrie et proposent des

lignes directrices pour le développement de cette filière [3, 4]. Cependant, ce programme se focalise principalement sur le cas européen [5, 6]. Dans cette étude, nous nous intéressons au cas des régions tropicales, qui disposent souvent d'un gisement solaire plus important que celui des zones européennes les plus ensoleillées. A La Réunion notamment, la part d'énergie consommée d'origine solaire thermique ne cesse d'augmenter depuis plus de 15 ans, passant de 2,2% de la consommation finale d'énergie primaire en 2000 à 21,2% en 2016 [7].

Au regard de cette situation, le projet CSIRT (Chaleur Solaire pour l'Industrie en Région Tropicale) a été lancé fin 2015. Initié par le laboratoire PIMENT en collaboration avec des institutions locales (ADEME, EDF, Région Réunion, ADIR<sup>1</sup>), son objectif est d'évaluer la faisabilité et la pertinence de l'utilisation de la chaleur solaire dans les procédés industriels existants. C'est dans ce contexte qu'un partenariat est né avec Sorélaït-Danone, une entreprise du secteur agroalimentaire et objet d'étude de ces travaux.

## 2. Le cas de l'usine Sorélaït-Danone existante

Actuellement, la production de chaleur de l'usine est destinée aux procédés de fabrication de produits laitiers et assurée par une chaudière fonctionnant au fioul et produisant de la vapeur saturée à 7 bars (soit environ 165°C). Cette vapeur alimente le procédé industriel composé de différentes unités et noté « USINE » sur la figure 1. En sortie de procédé, les condensats sont récupérés et mélangés dans une bache alimentaire avec de l'eau du réseau de ville en appoint. En effet, certains postes de production sont à vapeur perdue, il est donc nécessaire de rajouter de l'eau au système de production de chaleur. Enfin, l'usine dispose d'une surface de toiture de 2200 m<sup>2</sup>.

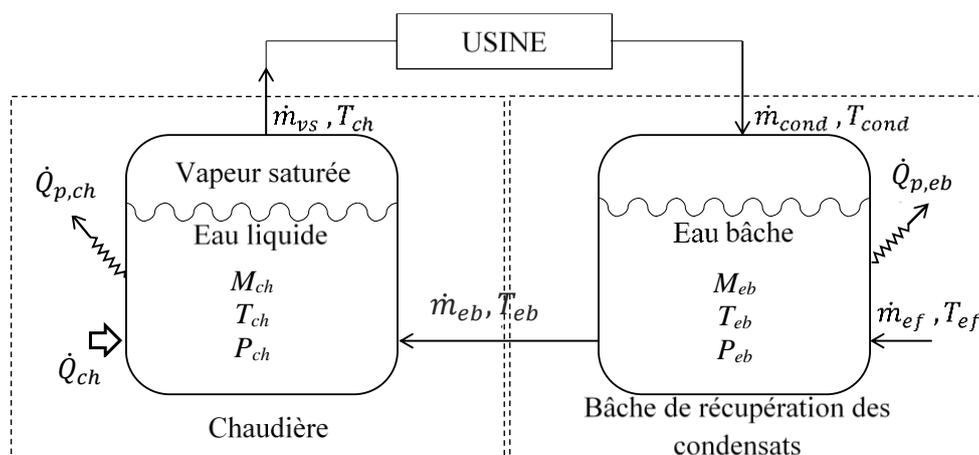


Figure 1 : Schéma du système de production de chaleur de l'usine Sorélaït-Danone

### 2.1. Modélisation de la bache de mélange

La bache de mélange, dont le volume est de 5 m<sup>3</sup>, sert à récupérer les condensats provenant de l'usine. Ils arrivent avec une température  $T_{cond}$  et un débit  $\dot{m}_{cond}$  et sont ensuite mélangés avec de l'eau froide (eau du réseau de ville) à une température  $T_{ef}$  et un débit  $\dot{m}_{ef}$  permettant de compenser les pertes en eau. La température de l'eau à l'intérieur de la bache  $T_{eb}$  est supposée uniforme et le tout est à pression atmosphérique  $P_{eb}$ . L'eau chaude sort de la bache à la

<sup>1</sup> ADIR : Association pour le Développement Industriel de La Réunion

température  $T_{eb}$  et avec un débit  $\dot{m}_{eb}$ . Les pertes thermiques vers l'extérieur (notées  $\dot{Q}_{p,eb}$ ) sont prises en compte. Le bilan massique de la bache est donné par :

$$0 = \dot{m}_{cond} + \dot{m}_{ef} - \dot{m}_{eb} \quad (1)$$

Son bilan énergétique s'écrit :

$$\frac{dU_{eb}}{dt} = \dot{m}_{cond} \cdot h_{cond} + \dot{m}_{ef} \cdot h_{ef} - \dot{m}_{eb} \cdot h_{eb} + \dot{Q}_{p,eb} \quad (2)$$

Enfin, les pertes thermiques de la bache se calculent ainsi :

$$\dot{Q}_{p,eb} = U g_{bache} \cdot A_{bache} \cdot (T_{amb} - T_{eb}) \quad (3)$$

Avec  $U g_{bache}$  le coefficient de transfert de chaleur global entre l'eau de la bache et l'air dans le local et  $A_{bache}$  la surface d'échange.

## 2.2. Modélisation de la chaudière

La chaudière [8] est alimentée par de l'eau chaude, à une température  $T_{eb}$  et un débit  $\dot{m}_{eb}$ , provenant de la bache. Elle est chauffée par un brûleur fonctionnant au fioul et délivrant un flux thermique noté  $\dot{Q}_{ch}$  pour produire de la vapeur saturée qui sort de la chaudière à la température  $T_{ch}$  et avec un débit  $\dot{m}_{vs}$ . Comme pour le modèle de bache, il n'y a pas de terme d'accumulation de masse et les pertes thermiques sont intégrées. Les bilans massiques et énergétiques de la chaudière sont donnés par :

$$0 = \dot{m}_{eb} - \dot{m}_{vs} \quad (4)$$

$$\frac{dU_{ch}}{dt} = \dot{m}_{eb} \cdot h_{eb} - \dot{m}_{vs} \cdot h_{vs} + \delta_{ch} \cdot \dot{Q}_{ch} + \dot{Q}_{p,ch} \quad (5)$$

De plus, les flux thermiques alimentant la chaudière et dissipés vers l'extérieur s'écrivent :

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{fioul} \cdot PCI_{fioul} \cdot \eta_{comb} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{p,ch} = U g_{ch} \cdot A_{ch} \cdot (T_{amb} - T_{ch}) \quad (7)$$

Avec  $PCI_{fioul} = 10200$  Wh/L (12000 Wh/kg) et  $\eta_{comb}$  le rendement de combustion considéré égal à 0,90.

Enfin, la régulation de la chaudière a été intégrée au modèle global. En effet, la production de chaleur de la chaudière doit permettre à tout moment d'obtenir le débit de vapeur demandée par l'usine. Quand la température atteint  $165^\circ\text{C}$  dans la chaudière, le brûleur s'éteint, la variable  $\delta_{ch}$  de l'équation (6) prend la valeur 0 et le flux alimentant la chaudière devient nul ; lorsque cette température chute en dessous de  $158^\circ\text{C}$ , le brûleur redémarre, dans ce cas  $\delta_{ch}$  est égal à 1 et le flux thermique chauffe l'eau de la chaudière.

### 3. Analyse expérimentale et simulation du système existant

#### 3.1. Mise en place d'une campagne de mesures

Dans le but de valider le modèle présenté précédemment, une campagne de mesures a été réalisée pendant trois mois. Cinq sondes (thermocouples de type T, +/- 0.5°C d'incertitude) ont été installées dans la chaufferie pour mesurer la température de retour des condensats ( $T_{cond}$ ), l'eau froide à l'entrée de la bache ( $T_{ef}$ ), l'eau chaude dans la bache ( $T_{eb}$ ), la vapeur à la sortie de la chaudière ( $T_{ch}$ ) et l'air dans le local technique ( $T_{amb}$ ). De plus, un capteur servant à mesurer la pression dans la chaudière a été installé ainsi que trois débitmètres permettant d'enregistrer les débits de fioul, d'eau chaude entrant dans la chaudière et d'eau froide entrant dans la bache. Les débits de vapeur et des condensats sont quant à eux calculés grâce aux équations (1) et (4). Enfin, une station météo a été installée sur le toit afin d'acquérir les conditions météorologiques du site. Toutes ces données sont enregistrées au pas de temps de dix secondes.

Sur la figure 2, on peut noter que la température de la vapeur mesurée en sortie de chaudière ( $T_{ch}$ ) varie très peu tout au long de la semaine jusqu'à l'arrêt du système samedi en fin d'après-midi. En revanche, la température de l'eau chaude dans la bache ( $T_{eb}$ ) varie sensiblement et dépend à la fois des différents cycles de production de l'usine et de l'ajout d'eau froide venant compenser la vapeur perdue. La température ambiante du local, quant à elle, suit une évolution classique, dépendante des conditions climatiques et donc de l'alternance jour/nuit.

La température de retour des condensats ( $T_{cond}$ ) est présentée sur la même figure 2. Son évolution, associée au débit des condensats (en figure 3), représente le besoin en chaleur de l'usine. On note par exemple une température de condensats relativement faible le samedi en milieu de journée ce qui coïncide avec le nettoyage de plusieurs postes de l'usine simultanément et donc une consommation importante de vapeur. La consommation de fioul est calculée en intégrant son débit sur une période donnée (figure 3).

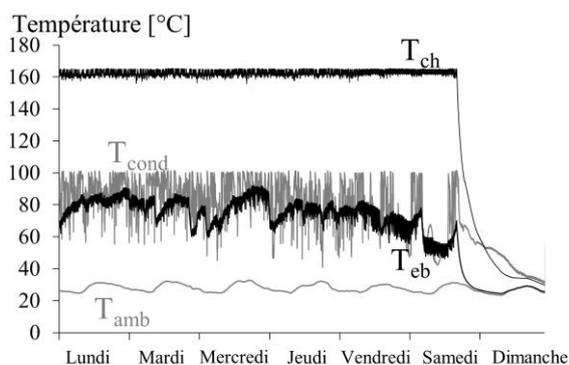


Figure 2 : Évolutions des températures de la vapeur en sortie de chaudière ( $T_{ch}$ ), des condensats ( $T_{cond}$ ), de l'eau dans la bache ( $T_{eb}$ ) et de l'air dans la chaufferie ( $T_{amb}$ ) sur une semaine.

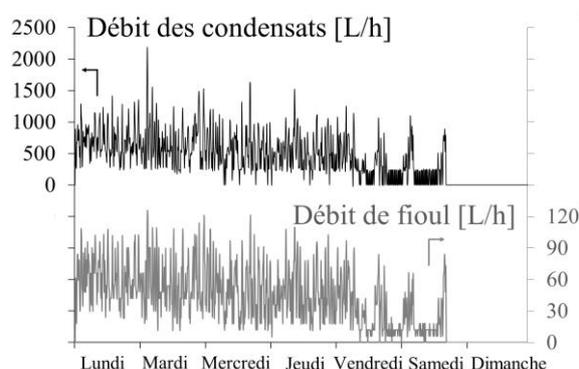


Figure 3 : Évolutions du débit des condensats et du débit de fioul consommé

#### 3.2. Comparaison modèle / mesures

La figure 4 présente la comparaison des températures mesurées et simulées de l'eau dans la bache de mélange. On peut noter que les valeurs calculées suivent relativement bien les données expérimentales tout au long de la journée.

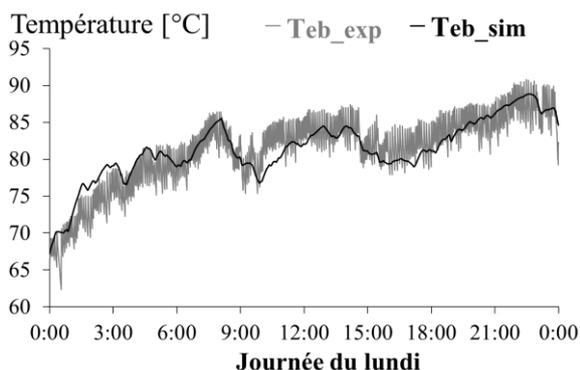


Figure 4 : Comparaison entre la température expérimentale et la température simulée de l'eau de la bache de récupération des condensats.

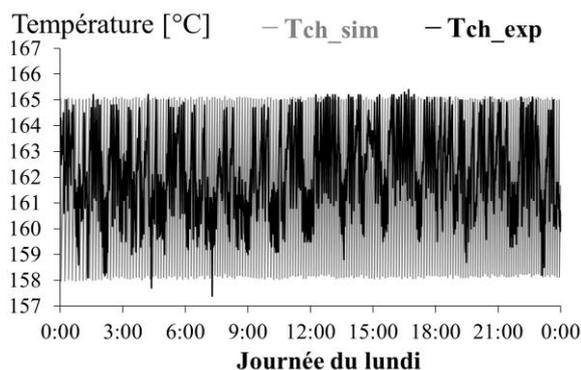


Figure 5 : Comparaison entre la température expérimentale et la température simulée de l'eau dans la chaudière.

Les évolutions des températures simulées et mesurées dans la chaudière sont présentées sur la figure 5. Mise à part le respect des minimums et maximums de température dans la chaudière, nos hypothèses ne permettent pas de corréler les évolutions des températures expérimentales et simulées entre les bornes. En revanche, en ce qui concerne la quantité de fioul consommée sur la journée, les relevés expérimentaux donnent une consommation de 1478 litres et le modèle l'estime à 1450 litres soit un écart relatif d'environ 1,9 %. La même analyse effectuée sur la semaine montre un écart du même ordre de grandeur (5827 litres mesurés contre 5682 litres estimés par le modèle soit un écart de 2,5%).

A ce stade, le bilan énergétique simulé et expérimental nous semble présenter une similitude suffisante pour étudier l'intégration de chaleur solaire dans le système.

## 4. Intégration solaire dans l'usine Sorélaït-Danone

### 4.1. Modélisation d'une boucle de production de chaleur solaire

A partir du modèle numérique présenté précédemment, il nous est à présent possible d'intégrer le système de production de chaleur solaire. Nous avons choisi la technologie de capteurs à tubes sous vide car ils permettent une production de chaleur avec des niveaux de température compris entre 50 et 200°C [9].

Nous avons opté pour une modélisation aux moyens de la méthode du rendement [10, 11] définie par :

$$\begin{cases} \eta = \eta_0 - a_1.T^* - a_2.G.(T^*)^2 \\ T^* = \frac{T_m - T_{ext}}{G} \text{ avec } T_m = \frac{T_e + T_s}{2} \end{cases} \quad (8)$$

Avec  $\eta_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$  les paramètres propres au capteur solaire choisi (VITOSOL 300-T de Viessmann) [12]. Le flux thermique récupéré par le fluide caloporteur traversant le champ de capteurs solaires est donné par l'équation suivante qui permet de prendre en compte un éventuel changement de phase du fluide dans le capteur :

$$\dot{Q}_{\text{capteur}} = \dot{m}_{\text{capteur}}.(h_s - h_e) = \eta.A_{\text{capteur}}.G \quad (9)$$

## 4.2. Résultats et discussion

Nous avons étudié les possibilités d'intégration [9] d'une boucle de production de chaleur solaire au système existant en considérant deux scénarios différents. Nous avons pu estimer la quantité de fioul économisée en faisant varier la surface de capteurs solaires (de 0 à 1200 m<sup>2</sup>) et en considérant un pas de temps de 10 secondes.

### 4.2.1. Cas 1 : Intégration au niveau de la bache de mélange

Dans la disposition actuelle de l'usine, la pression à l'intérieur de la bache de mélange est d'environ 1 bar. Comme on peut le voir sur la figure 2, les condensats arrivent dans cette bache à une température comprise entre 60 et 100°C et le potentiel d'énergie solaire qui peut être introduit dans ces conditions est très faible (seulement 0,3 % de fioul économisé au moyen de 6 m<sup>2</sup> de capteurs). Afin de déplacer la barre des 100°C liée à la pression atmosphérique, nous avons envisagé la pressurisation de la bache de mélange à une valeur maximum de 6 bars correspondant à une température de saturation de 158,8°C. Il s'avère que le capteur solaire que nous avons envisagé est capable de fonctionner à ces niveaux de pression et il est donc parcouru par le fluide présent dans la bache de mélange sans faire appel à l'utilisation d'un échangeur de chaleur intermédiaire. Dans ces conditions, toujours en ne considérant qu'un apport de chaleur sensible, environ 150 m<sup>2</sup> de capteurs suffisent pour atteindre ce niveau de température et permettant une économie de fioul de 7 % environ (figure 6a). Au-delà de 150 m<sup>2</sup>, la quantité d'énergie solaire non consommée ne cesse d'augmenter, ce qui révèle un certain déphasage entre les besoins de l'usine et la production du champ de capteurs solaires. Pour proposer une réponse à ce problème, deux solutions peuvent être envisagées : soit la mise en place d'une solution de stockage, soit une meilleure intégration de la chaleur solaire, en considérant cette fois un apport latent, réalisable uniquement au niveau de la chaudière. Nous orientons la suite de l'étude sur ce dernier point.

### 4.2.2. Cas 2 : Intégration au niveau de la chaudière

Dans ce deuxième cas d'intégration, une partie de la vapeur produite est directement issue de l'utilisation des capteurs solaires. Afin de s'affranchir des contraintes technologiques de pression élevée dans les capteurs solaires, nous avons opté pour un circuit primaire parcouru par un fluide caloporteur monophasique (huile) et un échangeur de chaleur intégré dans la chaudière. Les calculs pour cet échangeur ont été menés en considérant une efficacité de 70 % et les résultats sont présentés sur le graphique de la figure 6b.

Cette configuration permet une bien meilleure économie de fioul que la première, puisqu'une partie de la chaleur solaire permet de vaporiser l'eau de la chaudière à la place du brûleur. La quantité d'énergie solaire non consommée reste très faible, même pour de grandes surfaces de capteurs solaires, ce qui montre un meilleur phasage entre les besoins et la production de chaleur solaire. La quantité de fioul économisée varie quasi-linéairement en fonction de la surface de capteurs pour atteindre 28% pour 1200 m<sup>2</sup> de capteurs solaires. A certains moments de la journée et lorsque les surfaces sont suffisamment grandes, l'apport solaire est tel qu'il se substitue complètement à la chaudière fioul. Ce phénomène explique le léger fléchissement observé sur la figure 6b à partir 750 m<sup>2</sup>.

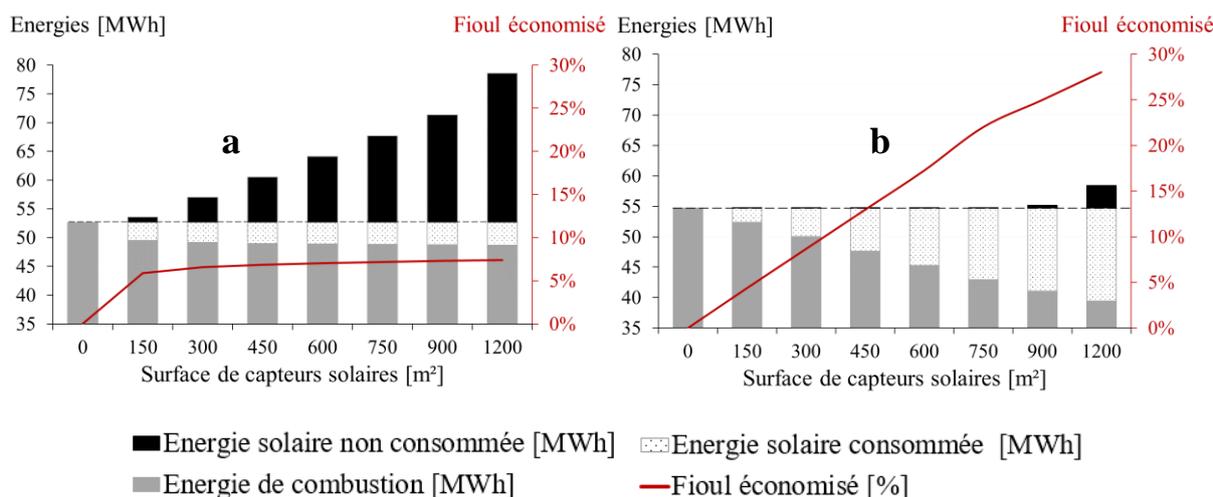


Figure 6 : Bilan énergétique et pourcentage de fioul économisé pour les deux scénarios d'intégration de la chaleur solaire (a : au niveau de la bache, b : au niveau de la chaudière)

## 5. Conclusion et perspectives

Dans ce papier, une étude sur la possibilité d'intégrer de la chaleur solaire à une entreprise située à La Réunion, en région tropicale a été présentée. Ce travail est basé sur la modélisation et la simulation dynamique du système existant seul, puis sur la simulation de l'intégration d'un champ de capteurs solaires thermiques dans le but d'économiser de l'énergie primaire fortement carbonée (fioul). Les résultats montrent l'intérêt de l'ajout de l'énergie solaire dans les moyens de production de chaleur existants de l'usine. Sur la base d'un bilan énergétique, deux scénarios d'intégration ont été étudiés et comparés. La solution d'intégration au niveau de la chaudière ressort comme étant la plus efficace en termes de réduction de la consommation de combustible, permettant une économie de 28% de fioul par l'installation de 1200 m<sup>2</sup> de capteurs solaires.

Par ailleurs, une augmentation de l'économie de combustible au-delà de ces 28% estimés nous semble réalisable. En effet, il est important de rappeler que l'usine Sorélait-Danone fonctionne 24 heures sur 24, ce qui limite les économies engendrées par l'intégration de chaleur solaire si aucune solution de stockage n'est envisagée. Le stockage paraît d'autant plus pertinent que l'usine dispose d'une surface de toiture importante (2200 m<sup>2</sup>). De plus, il serait judicieux d'analyser l'impact financier d'une installation permettant à la fois l'intégration et le stockage de chaleur solaire. Enfin, nous envisageons pour la suite, d'ajouter à cette étude un aspect exergetique en intégrant dans nos calculs le second principe de la thermodynamique. L'objectif étant de procéder à des optimisations énergétique, exergetique, et exergo-économique du système modélisé [13,14]. Ces travaux seront poursuivis et appliqués sur d'autres industries réunionnaises, d'ores et déjà identifiées.

## Références

- [1] C. Vannoni, R. Battisti, S. Drigo, Potential for Solar Heat in Industrial Processes, Madrid, 2008.
- [2] S. Kalogirou, The potential of solar industrial process heat applications, *Appl. Energy*, vol. 76, no. 4, pp. 337–361, 2003.
- [3] A. Einsentraut, A. Brown, Heating without global warming, International Energy Agency, 2014.

- [4] S. H. C. Task, S. H. Integration, and I. Processes, Guidelines Developed for Process Heat Integration, no. May, pp. 7–8, 2015.
- [5] O. Marc, E. Tapaches, W. Li, F. Sinama, J. Castaing-Lasvignottes, Intégration de chaleur solaire aux procédés industriels réunionnais : cas de l'usine Sorélaït-Danone, *XIII<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes*, ART-06-15, 22-24 mai 2017.
- [6] A. Sharma, C. Sharma, S. Mullick, T. Kandpal, Solar industrial process heating : A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (78), pp. 124-137, 2017
- [7] Bilan énergétique de l'île de La Réunion édition 2017 réalisé par l'Observatoire Énergie Réunion. <http://energies-reunion.com/wp-content/uploads/2015/01/BER-Technique-2016-BD.pdf>
- [8] STEIN ENERGIES, Fiche technique de STEIN ENERGIE SU95, STEIN ENERGIE Chaudières Industrielles, pp. 1–2, 2008.
- [9] S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari, A review on solar energy use in industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (15), pp. 1777-1790, 2011
- [10] O. Marc, Étude expérimentale, modélisation et optimisation d'un procédé de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment. Université de La Réunion, 2010.
- [11] O. Marc, F. Lucas, F. Sinama, A. Bastide, E. Monceyron, F. Garde, Modélisation simplifiée et éléments de validation expérimentale d'une installation de rafraîchissement solaire par absorption. IBPSA 2008.
- [12] Viessmann, Documentation technique des capteurs à tubes sous vide VITOSOL, Notice pour l'étude, pp. 30-32, 2015
- [13] R. Benelmir, A. Lallemand, M. Feidt, Analyse exergetique, *Techniques de l'ingénieur – Energies / Physique énergétique*, 2002
- [14] S. Sansaniwal, V. Sharma, J. Mathur, Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications : A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (82), pp. 1576-1601, 2018

## Remerciements

Les auteurs remercient l'appui fourni par tous les partenaires : l'ADEME, EDF, l'ADIR, la Région Réunion et l'entreprise Sorélaït-Danone. Ils soulignent le soutien de Jérôme Vigneron, technicien de laboratoire pour la partie mise en place du matériel de mesures et l'acquisition des données ainsi qu'Alexandre Oudin, stagiaire ingénieur au laboratoire pour la partie modèle numérique.