

Ébullition en film sous flux solaire concentré

Dylan LORFING¹, Quentin FALCOZ², Aras AHMADI¹, Régis OLIVÈS^{3*}

¹TBI, Université de Toulouse, CNRS, INRAE, INSA

135 Avenue de Rangueil, 31077, France

² PROMES-CNRS - Université de Perpignan Via Domitia

7 rue Félix Trombe, Odeillo - 66120 Font-Romeu

³ PROMES-CNRS - Université de Perpignan Via Domitia

Rambla de la thermodynamique - 66100 Perpignan

*(auteur correspondant : olives@univ-perp.fr)

Résumé - L'ébullition en film sous flux solaire concentré est étudiée à l'aide d'un dispositif expérimental constitué d'un cône renversé qui plonge partiellement dans un réservoir rempli d'eau et placé au foyer d'un concentrateur parabolique. Il s'agit d'analyser le régime d'ébullition en film, de déterminer les conditions opératoires nécessaires au bon fonctionnement du récepteur-évaporateur et d'évaluer ses performances thermiques selon ses propriétés. Un coefficient d'échange thermique en ébullition en film dans une géométrie conique est identifié et une corrélation semi-empirique est établie.

Nomenclature

D	diamètre, m	$boil$	ébullition
ep	épaisseur, m	ext	extérieur
g	gravité, $m.s^{-2}$	i	interface
h	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	in	entrée
h'	enthalpie, $J.kg^{-1}$	inf	inférieur
L_c	longueur caractéristique, m	int	intérieur
S	surface d'échange, m^2	l	liquide
T	température, K	out	sortie
<i>Symboles grecs</i>		per	pertes
α	demi-angle d'ouverture du cône, °	rec	récepteur
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	sat	saturation
ν	viscosité cinématique, m^2/s	sol	solaire
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$	sup	supérieure
σ	tension superficielle, $N.m^{-1}$	v	vapeur

Indices et exposants

1. Introduction

Le dessalement de l'eau de mer pour un approvisionnement en eau potable sécurisé fait partie des enjeux majeurs pour bon nombre de pays. Aussi, l'intégration des énergies bas-carbone dans les procédés de dessalement devient crucial. Ainsi, de plus en plus d'études portent sur la conception d'éco-procédés de dessalement de l'eau de mer utilisant, en particulier, l'énergie solaire [1]. Un système basé sur la génération de vapeur d'eau par ébullition de l'eau saumâtre à partir du rayonnement solaire concentré est proposé. Il s'agit de définir les conditions opératoires et la configuration géométrique adaptées à ce nouveau type de procédé. Dans le cadre de cette étude, un dispositif expérimental original a été mis en œuvre afin d'étudier les régimes d'ébullition sous flux solaire concentré. Il a été montré que le régime d'ébullition en film (régime de Leidenfrost) permettait de maintenir la surface d'évaporation propre, exempte de dépôt [1]. Or le dépôt de sel et de calcaire constitue un verrou technologique majeur dans

le développement des procédés de dessalement par voie thermique. Des expériences sont donc réalisées à l'aide de ce dispositif pour étudier le régime d'ébullition en film et donc de déterminer les conditions opératoires nécessaires au bon fonctionnement de l'évaporateur. Une étude théorique est aussi menée afin d'identifier le coefficient d'échange thermique en ébullition en film dans une géométrie conique et d'établir une corrélation semi-empirique. Les performances thermiques du système récepteur-générateur de vapeur sont alors évaluées en fonction de ses propriétés thermiques et géométriques.

2. Travail expérimental

2.1. Montage expérimental

Un dispositif expérimental a été mis au point pour pouvoir exploiter le rayonnement solaire concentré par un réflecteur parabolique installé au Four solaire d'Odeillo. Après une double réflexion le rayonnement est appliqué à la surface du récepteur-évaporateur. La figure 1 montre le système placé au foyer de la parabole à axe vertical. Le dispositif est constitué d'un récepteur, de son support et de deux réservoirs en polyméthacrylate de méthyle (PMMA), un réservoir principal dans lequel a lieu l'ébullition et un secondaire permettant de collecter le surplus de liquide (fig. 2).

Le récepteur-évaporateur est constitué d'une partie conique et d'un col circulaire permettant de faciliter sa fixation. La géométrie du récepteur peut être définie par 4 paramètres : le diamètre extérieur (D_{ext}), le diamètre intérieur (D_{int}) désignant le diamètre de la base de la cavité conique, le demi-angle d'ouverture de la cavité conique (α) et son épaisseur (ep) (fig 3). La forme conique a pour intérêt d'avoir sur la face supérieure une cavité qui piège l'énergie solaire augmentant l'efficacité du système. De plus, sur la face inférieure du récepteur, l'extraction de la vapeur semble facilitée par cette forme conique.

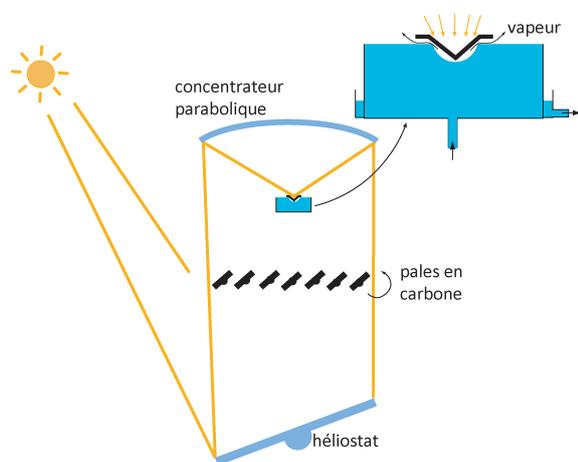


Figure 1 : Schéma du montage expérimental.

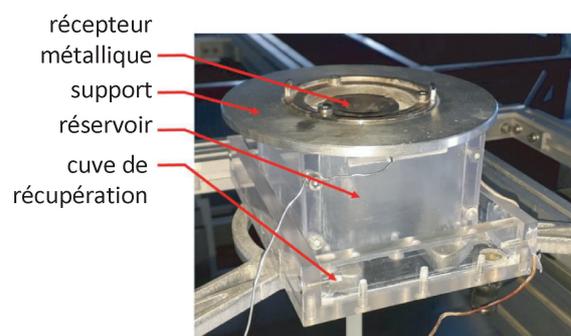


Figure 2 : photo du dispositif

Les températures mesurées par des thermocouples de type K sont la température ambiante (T_{amb}), la température de l'alimentation ($T_{l,in}$), des sorties liquide et vapeur ($T_{l,out}$ et $T_{v,out}$ respectivement) et enfin les températures des parois inférieures et supérieures du récepteur ($T_{rec,inf}$ et $T_{rec,sup}$ respectivement). La mesure de l'irradiation normale directe (DNI) est effectuée par un pyréliomètre.

Une caméra Basler acA1920-150 μ m CMOS couplée à une lentille avec une distance focale de 35 mm permet le suivi visuel de la partie immergée du récepteur.

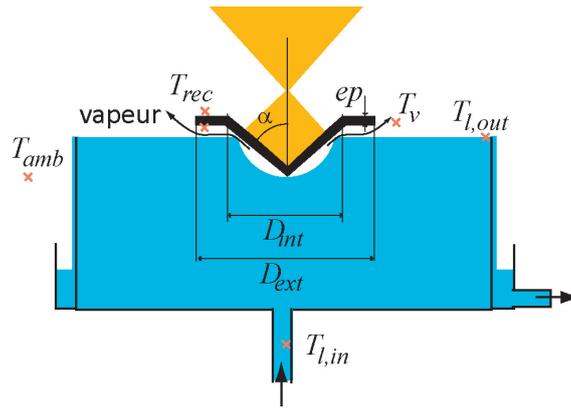


Figure 3 : Schéma du récepteur-évaporateur et de la cuve et position des thermocouples.

La cuve principale comporte une entrée d'eau en partie basse. L'alimentation en eau est assurée, de façon continue, par une pompe péristaltique. Une partie du liquide est vaporisée, la vapeur ainsi produite s'évacue naturellement dans l'atmosphère. La part de liquide non vaporisé atteint la cuve secondaire par débordement permettant de maintenir un niveau constant dans la cuve principale. Une sortie en fond de cuve secondaire assure l'évacuation du liquide par effet gravitaire; il est finalement collecté dans un réservoir de récupération. Deux balances numériques mesurent la masse en temps réel des deux réservoirs d'alimentation et de récupération en vue d'évaluer les débits d'eau et donc le débit de vapeur pour le bilan de masse.

2.2. Expérimentations

Durant l'expérimentation, le flux solaire concentré est absorbé par la surface supérieure du récepteur métallique. Sa température s'élève. La chaleur générée est transférée par conduction vers le bas du récepteur qui est immergé dans l'eau. L'ébullition a donc lieu sur l'ensemble de la surface inférieure immergée du récepteur métallique.

On constate sur la figure 4 que le film de vapeur commence par s'établir en haut de la partie immergée du récepteur puis progresse rapidement vers le bas du cône. Le temps nécessaire au passage en ébullition en film après le début de la crise d'ébullition dépend des conditions météorologiques, principalement du DNI, et du matériau utilisé pour le récepteur. Par exemple, pour le récepteur en cuivre de 40 mm de diamètre, 5 mm d'épaisseur avec un demi-angle d'ouverture de cône de 30°, la crise d'ébullition dure environ 20 secondes sous un flux d'environ 740 W, soit une densité de flux de 589 kW.m^{-2} . Afin de déclencher la crise d'ébullition rapidement, il est nécessaire de placer le récepteur de telle sorte à l'avoir faiblement immergé. Lorsque le cône est suffisamment haut en température (200°C), la circulation d'eau est amorcée et l'ébullition démarre.

Une fois le film de vapeur mis en place, il reste stable même si la puissance entrante est diminuée. On constate ainsi que, lorsque le DNI diminue, le film se maintient grâce à l'inertie thermique du récepteur, et ce jusqu'à ce que la température de surface passe en dessous de 300°C .

On constate aussi un changement significatif concernant l'évacuation de la vapeur entre le régime d'ébullition nucléée et l'ébullition en film. En effet, lors de l'ébullition nucléée, le mouvement des bulles dans le liquide provoque des remous et notamment l'éjection de gouttelettes entraînées par la vapeur d'eau, conduisant à l'apparition d'un panache. Lors de l'ébullition en

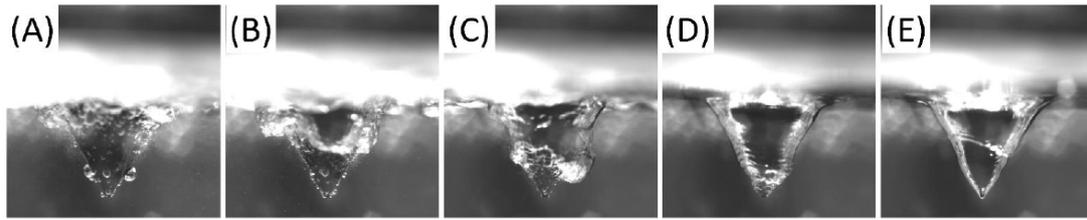


Figure 4 : Photographies de la crise d'ébullition : (A) ébullition nucléée, (B) début de la crise d'ébullition, (C) progression du film de vapeur, (D) fin de la crise d'ébullition, (E) ébullition en film totalement établie

film, la vapeur formée n'entraîne pas de gouttelettes d'eau, le panache de vapeur n'est plus visible (5).

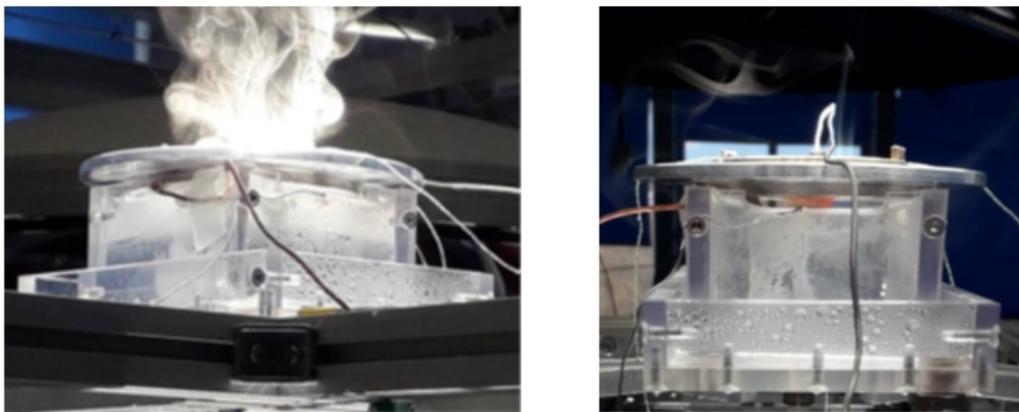


Figure 5 : Photographie du panache de vapeur en ébullition (A) nucléée et (B) en film

Plusieurs séries d'expérimentations ont été effectuées. La figure 6 représente les températures et puissances reçues en fonction du temps lors d'une expérimentation réalisée avec un récepteur en cuivre ($D_{ext} = 40 \text{ mm}$, $D_{int} = 21 \text{ mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $ep = 5 \text{ mm}$). Lors de cette expérimentation la puissance maximale disponible a été imposée au récepteur, jusqu'à l'obtention de la crise d'ébullition. Après la mise en place de l'ébullition en film, la surchauffe du récepteur a été évitée par régulation du flux d'entrée, deux niveaux de puissance ont été observés en régime permanent en ébullition en film. Entre le début de la mise en place du film ($t = 2\,600 \text{ s}$) et la stabilisation des températures du récepteur (température inférieure et supérieure) peu de temps après l'installation complète du film de vapeur ($t = 2\,900 \text{ s}$), soit en 300 s , le récepteur passe d'une température de 175 à 879°C pour la surface supérieure et de 172 à 872°C pour la surface inférieure.

Dans le cas du régime d'ébullition en film, au vu des expérimentations menées il apparaît que la diminution de l'angle de demi-ouverture du cône, l'utilisation de l'acier et le travail à des puissances concentrées plus faibles conduisent à de meilleures performances.

Il convient de noter que dès la première expérimentation une couche d'oxyde se forme à la surface du récepteur. Cette couche d'oxyde a l'avantage d'augmenter l'absorptivité et donc l'efficacité du récepteur. L'un des intérêts attendus du fonctionnement en film de vapeur est la protection de la paroi du récepteur vis-à-vis des dépôts de sel. L'eau du réseau utilisée au laboratoire étant calcaire, des observations ont pu être faites. En effet, au cours d'une

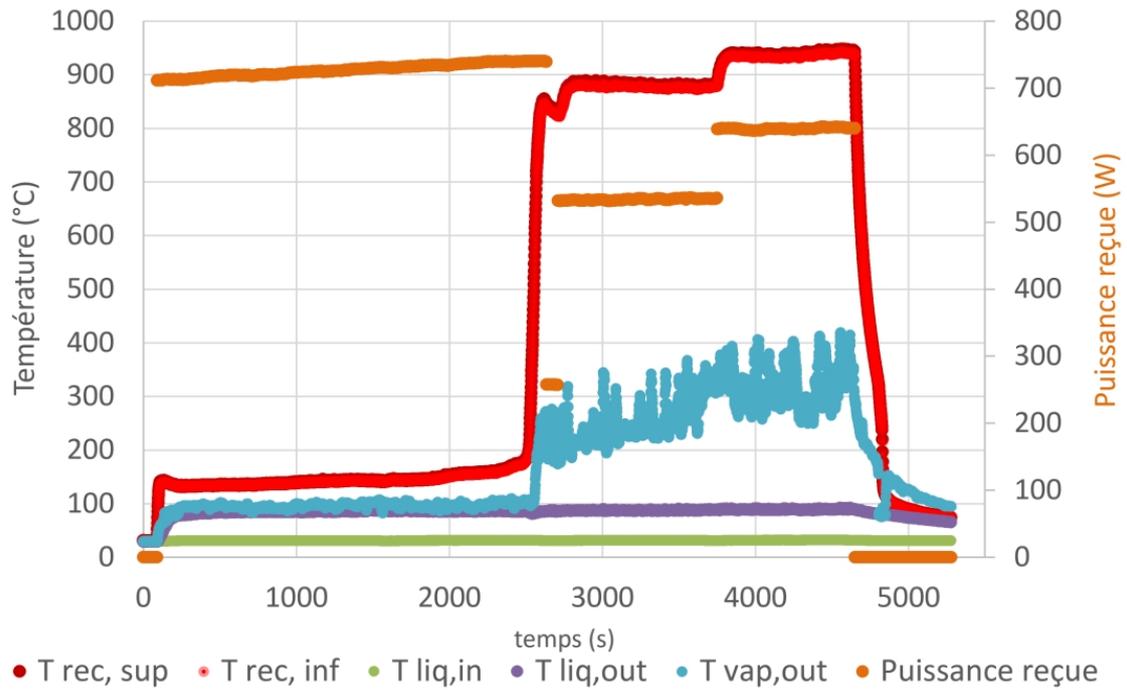


Figure 6 : Températures et puissance lors d'une expérimentation

série d'expérimentations, la comparaison de l'état du récepteur lors d'un fonctionnement en ébullition en film de vapeur et lors d'un fonctionnement en ébullition nucléée a été faite. La figure 7(A) montre l'état de la surface inférieure du récepteur en cuivre avec un demi-angle d'ouverture de 30° après un fonctionnement pendant 2 h en régime d'ébullition nucléée. La figure 7(B) montre quant à elle l'état de surface du même récepteur après un fonctionnement majoritairement en régime de film (mise en place du film en environ 30 minutes et maintien durant 1h30). On constate une différence importante sur l'état du récepteur dans les deux cas. Le dépôt de calcaire recouvre l'ensemble du récepteur lors d'un fonctionnement en régime nucléé alors que seule la zone à la base du cône est atteinte par ce dépôt dans le cas de l'ébullition en film. Dans le cas de l'ébullition en film, le début de la zone de dépôt correspond à la zone émergée du récepteur. L'ensemble de la paroi immergée semble nettement avoir été protégée du dépôt par le film de vapeur.

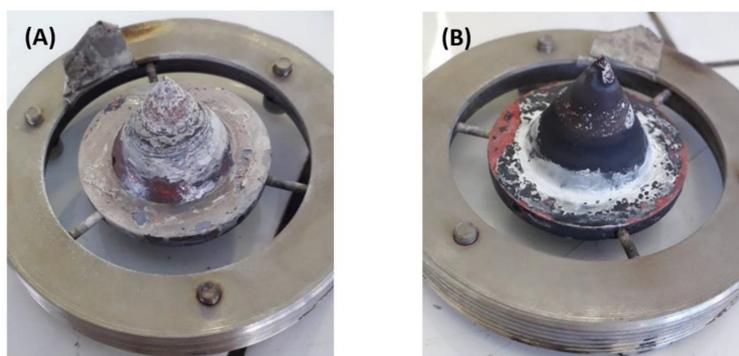


Figure 7 : Etat de surface du récepteur après utilisation en régime nucléé (A) et régime en film (B)

3. Modélisation

Le modèle repose sur les équations de bilan de masse et d'équilibre liquide-vapeur dans la cuve principale [2]. Les bilans d'énergie sur les différentes parties du système permettent de relier les puissances mises en jeu. La puissance transmise à l'eau via le récepteur \dot{Q}_{boil} est reliée à la puissance du rayonnement solaire concentré \dot{Q}_{sol} qui arrive à la surface du récepteur et à la puissance perdue \dot{Q}_{per} par réflexion, rayonnement et convection au niveau du récepteur. On considère que la puissance absorbée par le récepteur est intégralement transmise par conduction à la surface inférieure.

$$\dot{Q}_{boil} = \dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{per} \quad (1)$$

La puissance transmise à l'eau \dot{Q}_{boil} se répartit en deux contributions, l'une correspondant à la génération de vapeur qui se fait au débit massique \dot{m}_v et l'autre à la variation d'enthalpie de l'eau liquide entre l'entrée et la sortie avec un débit \dot{m}_l pris à la sortie :

$$\dot{Q}_{boil} = \dot{m}_v(h'_v - h'_{l,in}) + \dot{m}_l(h'_{l,out} - h'_{l,in}) \quad (2)$$

Outre les pertes thermiques par convection et rayonnement au niveau des parois de la cuve qui ont été évaluées par ailleurs [1], il s'agit de déterminer le transfert thermique par ébullition en film :

$$\dot{Q}_{boil} = h_{boil} S_{inf} (T_{rec,inf} - T_{sat}) \quad (3)$$

où T_{sat} est la température de saturation. S'ensuivra l'identification du coefficient d'échange h_{boil} . Bromley propose une relation implicite qui peut, en première approximation, s'exprimer de la façon simplifiée suivante [3] :

$$h_{boil} = h_{conv} + \frac{3}{4} h_{rad} \quad (4)$$

Comme aucune expression du coefficient d'échange n'est disponible dans la littérature pour un cône orienté vers le bas lors d'une ébullition en cuve, la configuration choisie dans cette étude est celle de la plaque plane inclinée. En première approximation, cela se justifie par le fait que le rayon de la section transversale du cône est suffisamment grand par rapport à l'épaisseur du film de vapeur. Ainsi, la contribution convective peut être évaluée à partir de la corrélation de Bromley [3] :

$$h_{conv} = C \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v) h'_v \lambda_v^3}{\nu_v (T_{rec,inf} - T_{sat}) L_c} \right]^{1/4} \quad (5)$$

où L_c est la dimension caractéristique et C une constante qui dépend de la géométrie. De ce fait, L_c correspond à la longueur de la génératrice du cône. L'inclinaison de la surface est alors prise en compte par l'introduction d'un terme correctif lié au demi-angle d'ouverture α et se traduit par une gravité apparente $g \cdot \cos(\alpha)$.

Le coefficient d'échange par rayonnement est, quant à lui, estimé à partir de la relation suivante :

$$h_{rad} = \frac{\sigma (T_{rec,inf}^2 + T_{sat}^2) (T_{rec,inf} + T_{sat})}{(1/\epsilon_{rec,inf}) + (1/\epsilon_i) - 1} \quad (6)$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann, $\epsilon_{rec,inf}$ et ϵ_i les émissivités respectives de la surface inférieure du récepteur et de l'interface vapeur/liquide [4].

4. Résultats et discussion

À partir de différentes expérimentations, il a été possible d'identifier le coefficient d'échange à l'aide des relations (4), (5) et (6). La figure 8 présente les résultats obtenus pour une série d'expérimentations réalisées sur un récepteur en cuivre ($D_{ext} = 40$ mm, $D_{int} = 21$ mm, $\alpha = 30^\circ$, $ep = 5$ mm d'épaisseur). À l'aide de la méthode des moindres carrés, les valeurs de températures et de débit de vapeur obtenues par le modèle sont comparées à celles mesurées et le coefficient C intervenant dans l'équation (5) est identifié : $C = 1,069$. On obtient des coefficients d'échange convectif de l'ordre de $160 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

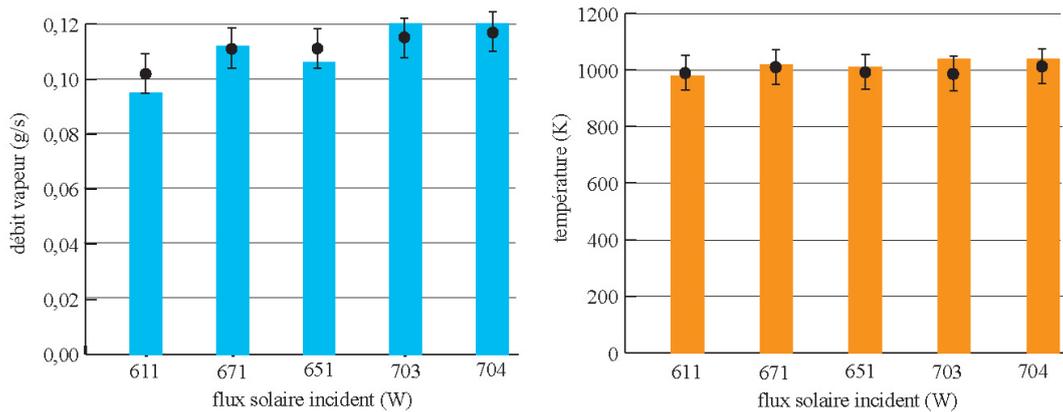


Figure 8 : Comparaison entre les valeurs modélisées (barres) et expérimentales (●) du débit de vapeur (barre d'erreurs de 7%) et de la température de la surface inférieure du récepteur (barre d'erreurs de 5%), obtenues pour différents flux solaires incidents.

Suite à l'identification des différents paramètres et en particulier des températures, il est constaté que le rayonnement contribue à hauteur de 18% au transfert au niveau du film (soit un coefficient d'échange h_{rad} de l'ordre de $35 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Compte tenu des températures, la densité de puissance est d'environ 140 kW.m^{-2} , soit un flux $\dot{Q}_{boil} = 260 \text{ W}$.

Un indicateur de performance est le rendement thermique qui peut être défini par la relation suivante :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_{per}}{\dot{Q}_{sol}} \quad (7)$$

Ainsi, à partir du modèle, un cas de référence a pu être établi [1]. Sous un flux solaire concentré de 1000 W et avec un débit de $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$, on obtient un rendement thermique d'environ 82%. Les principales pertes sont dues à la radiativité du récepteur, c'est-à-dire au rayonnement émis et réfléchi par la partie conique du récepteur. Elles sont de l'ordre de 15%. Les autres pertes sont liées aux pertes par convection. Une amélioration notable consisterait à opter pour un revêtement sélectif en partie supérieure (une forte absorbance dans le spectre visible et une faible émissivité dans le spectre infrarouge).

Outre l'émissivité, un paramètre intéressant est le demi-angle d'ouverture. Une étude de sensibilité a été menée afin de connaître son influence sur le rendement thermique. Or, a priori, ce paramètre induit deux effets parallèles : un premier sur la surface d'échange et un second sur les propriétés optiques de la cavité. Il s'avère qu'il a une influence nettement plus forte sur la surface d'échange. Enfin, et de façon globale, la figure 9 montre la variation du rendement thermique en fonction de α . Les meilleures performances sont obtenues pour un demi-angle le plus faible possible. En effet, un petit demi-angle améliore l'effet cavité permettant de piéger le

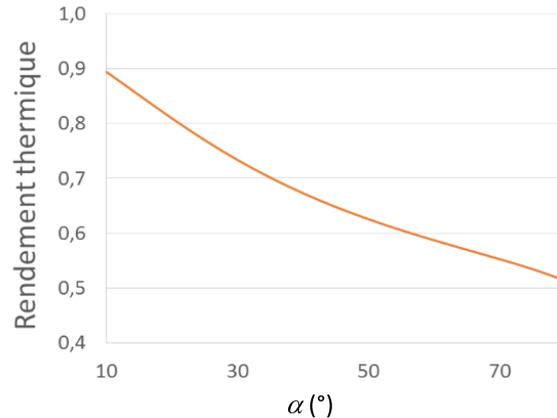


Figure 9 : Rendement thermique pour différents demi-angles d'ouverture du cône du récepteur

rayonnement et augmente la surface immergée. En outre, cette configuration semble avoir tendance à favoriser l'évacuation de la vapeur. Afin de confirmer ce point, une analyse numérique sur l'écoulement dans la cuve devra être effectuée.

5. Conclusion

Dans le cadre de la conception d'éco-procédé de dessalement de l'eau de mer utilisant l'énergie solaire, un dispositif a été conçu pour étudier l'ébullition sous flux solaire concentrée. Ce montage a permis de valider le modèle théorique d'un récepteur-évaporateur de forme conique. L'identification de paramètres tels que les températures et le débit de vapeur a pu être menée en régime d'ébullition en film (régime de Leidenfrost). Le coefficient d'échange entre la paroi et le film de vapeur a été évalué à partir de corrélations semi-empiriques établies dans des configurations géométriques différentes. Afin de compléter l'analyse, il s'agira désormais d'identifier le coefficient d'échange pour différents demi-angles de cône. D'autres expérimentations permettront de connaître le comportement selon les matériaux de récepteur envisagés tels que le cuivre, la fonte ou l'acier 304L. Le même type d'expérimentation sera mené avec de l'eau salée en régime de Leidenfrost afin de mettre en évidence les phénomènes induits par la présence du sel et l'influence du film sur la préservation de la surface chauffante. Afin d'affiner la compréhension du comportement du récepteur-évaporateur, une modélisation numérique sera nécessaire. Elle devra prendre en compte le couplage des phénomènes de changement de phase et de convection thermosolutale sous flux solaire concentré et aura pour objectif d'établir les conditions optimales de fonctionnement pour la génération de vapeur à partir d'eau salée.

Références

- [1] D. Lorfing, *Éco-procédé thermosolaire hybride de dessalement d'eau de mer sous concentration*, Thèse de doctorat, Univ. Féd. Toulouse M.-P. (2021).
- [2] D. Lorfing et al., Design and performance of a new type of boiler using concentrated solar flux, *En. Conv. Man.*, 249 (2021).
- [3] L.A. Bromley, Heat transfer in stable film boiling, *Chem. Eng. Prog.*, 46-5 (1950) 221-227.
- [4] V.P. Carey, *Liquid-Vapor phase-change phenomena*, CRC Taylor&Francis Group 3rd Ed (2020).

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à Emmanuel Guillot, Nicolas Bouillet, Roger Garcia et Claude Le Men pour leur soutien technique.