

Impact du pas horaire sur les performances d'un concentrateur cylindro-parabolique

Oussama ACHKARI^{*1}, Abdellah EL FADAR^{*2}, Hanae EL KALKHA^{*3}

**Laboratoire de Technologies Innovantes, Université ABDELMALEK ESSAADI
BP 1818 Tanger Principal-Tanger-Maroc*

¹oussama.achkari@gmail.com

²aelfadar@yahoo.fr

³elkalkha_hanae@yahoo.fr

Abstract— Dans ce travail, nous étudions les performances thermiques d'une installation solaire thermodynamique à concentrateur cylindro-parabolique muni d'un système de suivi solaire basé sur des algorithmes astronomiques et géographiques calculant la position instantanée du soleil.

Dans un premier temps, nous simulons et analysons plusieurs scénarios pour déterminer les périodes de l'année pour lesquelles l'utilisation d'un suiveur solaire est plus rentable.

Ensuite, nous modifions l'installation en utilisant un concentrateur fixe, sans traqueur solaire, et faisant varier les angles d'inclinaison pour déterminer la position et la période pour lesquelles cette configuration est plus performante qu'une installation munie d'un traqueur solaire.

Finalement, nous étudions l'impact du « pas horaire » du traqueur solaire sur la production thermique et la consommation électrique, pour identifier « le pas » qui permettrait de maximiser le gain thermique net.

Keywords— Energie solaire ; Concentrateur Cylindro-parabolique ; Suiveur solaire ; Performances thermiques ; Simulation numérique

I. INTRODUCTION

L'énergie solaire constitue l'une des alternatives les plus prometteuses aux sources d'énergie fossiles, notamment dans les régions fortement ensoleillées, d'une part, pour couvrir une part conséquente des besoins énergétiques et, d'autre part, pour contribuer à pallier les problèmes environnementaux comme la pollution et le réchauffement climatique engendrant des phénomènes ayant des répercussions néfastes sur l'écosystème.

Le solaire thermique à concentration se trouve actuellement à un niveau avancé de maturité et peut jouer un rôle vital dans de nombreux domaines, tels que la production de l'électricité, de la chaleur et du froid. Le rendement de ces systèmes s'améliore manifestement par l'utilisation des suiveurs solaires qui les orientent continuellement vers le soleil afin de maximiser le flux du rayonnement solaire capté au niveau de l'absorbeur.

Le premier traqueur solaire a été introduit par Finster en 1962 [1], il s'agissait d'un engin complètement mécanique. Une année plus tard, Saavedra a conçu un nouveau traqueur automatisé par un système électronique pour orienter le pyréliomètre EPPLEY [1]. Depuis ce temps et jusqu'à aujourd'hui les modifications et les inventions dans ce

domaine n'ont pas arrêté d'apparaître dans l'unique but de trouver un traqueur qui permet d'avoir des performances optimales sur le plan technico-économique.

D'autres études ont montré que même si le suivi du soleil n'est pas instantané et que le système solaire est décalé de 10° par rapport au rayonnement direct, la production thermique représente toujours 98,5% de celle obtenue par un système de suivi instantané [2]. Dans ce contexte, nous avons choisi de nous focaliser sur l'impact du pas horaire d'un traqueur « date/time » sur la production thermique d'une installation d'eau chaude utilisant un concentrateur cylindro-parabolique. L'objectif étant d'identifier la configuration qui donne le meilleur compromis entre la production thermique et la consommation électrique.

II. NOMENCLATURE

| | |
|------------|--|
| A_1 | Irradiation solaire extraterrestre (W/m^2) |
| A_{ap} | Surface d'ouverture du collecteur (m^2) |
| B | Coefficient d'atténuation du rayonnement solaire lorsqu'il traverse l'atmosphère (-) |
| C_{pf} | Chaleur spécifique de l'eau ($J/kg \cdot ^\circ C$) |
| C_{pmet} | Chaleur spécifique du métal du réservoir ($J/kg \cdot ^\circ C$) |
| F^- | Facteur d'efficacité du capteur (-) |
| F_r | Facteur de dissipation de chaleur du capteur (-) |
| h_{r-ra} | Coefficient des pertes thermiques par radiation entre l'absorbeur et le milieu environnant ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) |
| h_w | Coefficient des pertes thermiques par convection entre l'absorbeur et le milieu environnant ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) |
| I_b | Irradiation solaire directe (W/m^2) |
| M_{met} | Masse du réservoir (kg) |
| M_{st} | Masse de l'eau dans le réservoir (kg) |
| ND | Numéro du jour de l'année (-) |
| $-P_L/P_0$ | Rapport entre la pression du site géographique et la pression atmosphérique |
| $Q_{u,th}$ | Puissance thermique utile produite (W) |
| T_{in} | Température à l'entrée de l'absorbeur ($^\circ C$) |
| T_{out} | Température à la sortie de l'absorbeur ($^\circ C$) |
| T_{st} | Température moyenne du fluide dans le réservoir du stockage ($^\circ C$) |
| U_1 | Coefficient global des pertes thermiques ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) |

TABLEAU 1: CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

| Paramètre | Symbole | valeur |
|--|---------------|--------|
| Longueur du collecteur (m) | L | 1,9 |
| Largeur de l'ouverture du collecteur (m) | H | 1 |
| Diamètre extérieur du récepteur (m) | $D_{r,ext}$ | 0,03 |
| Diamètre intérieur du récepteur (m) | $D_{r,int}$ | 0,026 |
| Température ambiante (°C) | T_{amb} | 21 |
| Débit (kg/h) | q_m | 30 |
| Vitesse du vent (m/s) | v | 5 |
| Emissivité du réflecteur | ε | 0,9 |
| Réflectivité du réflecteur | ρ | 0,85 |
| Absorptivité de l'absorbeur | α | 0,87 |
| Hauteur du réservoir (m) | h | 0,417 |
| Diamètre du réservoir en (m) | D | 0,390 |
| Masse du réservoir (kg) | M_{met} | 9 |
| Chaleur spécifique du réservoir (J/kg.K) | C_{pmet} | 460 |
| Masse de l'eau dans le réservoir (kg) | m_f | 40 |

III. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

L'installation que nous avons étudiée théoriquement se compose principalement d'un concentrateur cylindro-parabolique (Fig.1) qui concentre le rayonnement direct sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur.

Le concentrateur cylindro-parabolique est accompagné d'un système de poursuite de soleil, dont l'objectif est de pouvoir suivre le soleil sur l'axe NORD-SUD en permanence, indépendamment des conditions climatiques. En effet, il s'agit d'un circuit électronique qui calcule instantanément la position du soleil à partir des corrélations astronomiques plus au moins précises, proposées par Jean MEEUS [3]. Ensuite, il commande un moteur pas à pas de façon à réorienter le système solaire vers la nouvelle position du soleil calculée.

Les dimensions et les caractéristiques de cette installation sont décrites dans le tableau 1.

IV. MODELE MATHEMATIQUE

1. Hypothèses et Simplifications

Durant la simulation numérique, nous avons considéré que :

- la température ambiante est constante ;
- les pertes thermiques relatives au circuit de distribution hydraulique entre le réservoir et le récepteur sont négligeables. Par conséquent, la température à l'entrée du récepteur est égale à la température de stockage.

2. Calcul de la Position du Soleil

Afin d'estimer la position instantanée du soleil nous avons utilisé l'algorithme le plus précis à l'heure actuelle, proposé par Jean Meeus, qui donne des résultats avec une erreur de $\pm 0,0003^\circ$ valables entre l'année -2000 et 6000.

Vu le nombre important des équations mathématiques qui décrivent cet algorithme, nous nous limitons à citer uniquement la référence bibliographique qui les regroupe [3].

3. Calcul des Performances Thermiques de l'Installation

L'efficacité thermique instantanée d'un concentrateur cylindro-parabolique est définie comme étant le rapport entre la puissance thermique utile produite et l'irradiation solaire directe reçue par le concentrateur. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\eta_{th} = \frac{Q_{u,th}}{I_b \times A_{ap}} \quad (1)$$

L'irradiation solaire directe I_b et la puissance thermique utile $Q_{u,th}$ sont calculées entre 9h et 17h avec un pas de temps d'une minute, en fonction de coordonnées solaires instantanées estimées par la méthode de Jean MEEUS.

Pour calculer l'irradiation solaire directe I_b , on calcule, d'abord, l'angle d'incidence I que fait le rayonnement solaire direct avec le vecteur normal à la surface d'ouverture ; il dépend de l'angle zénithal du soleil θ_z , de l'angle d'inclinaison du concentrateur cylindro-parabolique par rapport au plan horizontal w et l'azimut géocentrique du soleil Γ et de l'azimut du collecteur cylindro-parabolique (positif vers l'Ouest à partir du Sud). Il est estimé par la relation suivante :

$$I = \arccos(\cos \theta_z \times \cos w + \sin w \times \sin \theta_z \times \cos(\Gamma - \gamma)) \quad (2)$$

Ensuite on calcule l'irradiation solaire totale I_{DN} incidente sur un plan horizontal en utilisant l'équation suivante :

$$I_{DN} = A_1 \times \exp\left(-\frac{P_L}{P_0} \times \frac{B}{\sin \theta_e}\right) \quad (3)$$

avec,

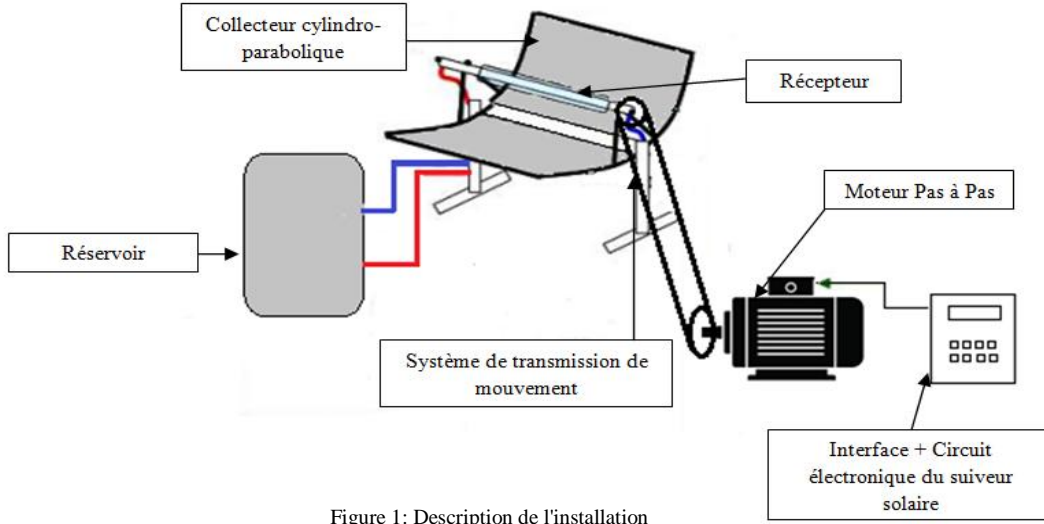


Figure 1: Description de l'installation

$$\frac{-P_L}{P_0} = \exp(0,0001184 \times H_{alt}) \quad (4)$$

$$B = 0,175 \times (1 - 0,2 \times \cos(0,93 \times ND)) - 0,0045 \times (1 - \cos(1,86 \times ND)) \quad (5)$$

et

$$A_1 = 1185 \times (1 + 0,066 \times \cos(360 \times \frac{ND}{370})) \quad (6)$$

Finalment, on obtient la valeur de I_b qui est égale à :

$$I_b = I_{DN} \times \cos(I) \quad (7)$$

D'autre part, la puissance thermique utile produite sera aussi calculée dans un intervalle de temps qui varie entre 9h et 17h avec un pas d'une minute. Elle dépend de l'irradiation solaire absorbée instantanément par le récepteur H_{ab} , de la température du fluide dans le réservoir du stockage et des deux coefficients des pertes thermiques F_R et U_l . Elle est estimée de la sorte :

$$Q_{u,th} = A_{ap} \times F_R \left(H_{ab} - \frac{A_{r,ext}}{A_{ap}} \times U_l \times (T_{f,i} - T_{amb}) \right) \quad (8)$$

avec,

$$U_l = h_w + h_{r,r-a} \quad (9)$$

et

$$F_R = \frac{MC_P}{A_{r,int} \times U_l} \times \left(1 - \exp\left(\frac{-A_{r,int} \times U_l \times F^-}{MC_P} \right) \right) \quad (10)$$

Pour un récepteur tubulaire ayant un diamètre intérieur $D_{r,int}$, un diamètre extérieur $D_{r,ext}$ et un coefficient de transfert convectif avec le fluide caloporteur $h_{c,i}$. Le paramètre F^- est donné par la formule suivante :

$$F^- = \frac{1}{U_l} \left(\frac{1}{U_l + \frac{D_{r,ext}}{h_{c,i} \times D_{r,int}}} + \frac{D_{r,ext} \times \ln\left(\frac{D_{r,ext}}{D_{r,int}}\right)}{2 \times K_r} \right) \quad (11)$$

Quant à la température du fluide à l'entrée du récepteur T_{fi} , elle peut être calculée par la méthode numérique des différences finies, en discrétisant la forme différentielle suivante [4] :

$$(M_{st} \times C_{pf} + M_{met} \times C_{pmet}) \times \frac{dT_{st}}{dt} = m_f \times C_{pf} \times (T_{out} - T_{in}) + U_l \times A_{st} \times (T_{amb} - T_{st}) \quad (12)$$

V. SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Dans un premier temps, nous avons calculé la position du soleil durant toute la journée en se basant sur l'algorithme de Jean MEUS. Les résultats obtenus ont été utilisés pour évaluer l'irradiation solaire théorique.

Ensuite, nous avons intégré la forme différentielle de l'équation (12) pour obtenir la température du fluide dans le réservoir de stockage. Finalment, nous avons combiné tous les paramètres pour calculer la puissance thermique instantanée de l'installation ainsi que le coefficient de performance thermique.

VI. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette section, nous allons présenter les résultats de plusieurs simulations numériques réalisées sur Matlab. L'objectif principal de ces simulations est de déterminer l'impact du pas horaire d'un suiveur solaire astronomique sur les performances thermiques d'une installation d'eau chaude par un concentrateur cylindro-parabolique, dans la région de Tanger.

1. Variation des Performances du Suiveur Solaire en Fonction des Saisons

A partir de la figure 2, nous pouvons constater que dans certains cas de figure, une installation fixe se présente plus performante qu'une installation muni d'un suiveur solaire selon l'axe NORD-SUD. En effet, entre le mois d'avril et le mois d'août, la production thermique de cette dernière est moins importante que celles d'une installation fixe avec les configurations du tableau 2.

En revanche, la figure 3 montre que le système de suivi solaire a un impact plus important sur la production thermique pendant l'hiver ; en effet, nous pouvons constater qu'une installation fixe est beaucoup moins performante que celle qui suit continûment le soleil.

TABLEAU 2: CONFIGURATIONS POUR LESQUELLES UNE INSTALLATION FIXE EST PLUS PERFORMANTE QU'UNE INSTALLATION AVEC SUIVEUR

| Plage horaire | Performances thermiques | | | |
|---------------|---|---|--|--|
| | Installation fixe Angle d'inclinaison=5° | Installation fixe Angle d'inclinaison=10° | Installation fixe Angle d'inclinaison=25° | Installation fixe Angle d'inclinaison=35° |
| 9h-10h | | | Plus performante qu'une installation avec suiveur | Plus performante qu'une installation avec suiveur |
| 10h-11h | | | | |
| 11h-14h | | | Moins performante qu'une installation avec suiveur | Moins performante qu'une installation avec suiveur |
| 14h-15h | | | | |
| 15h-17h | | | Plus performante qu'une installation avec suiveur | Plus performante qu'une installation avec suiveur |
| 9h-17 | Plus performante qu'une installation avec suiveur | Plus performante qu'une installation avec suiveur | | |

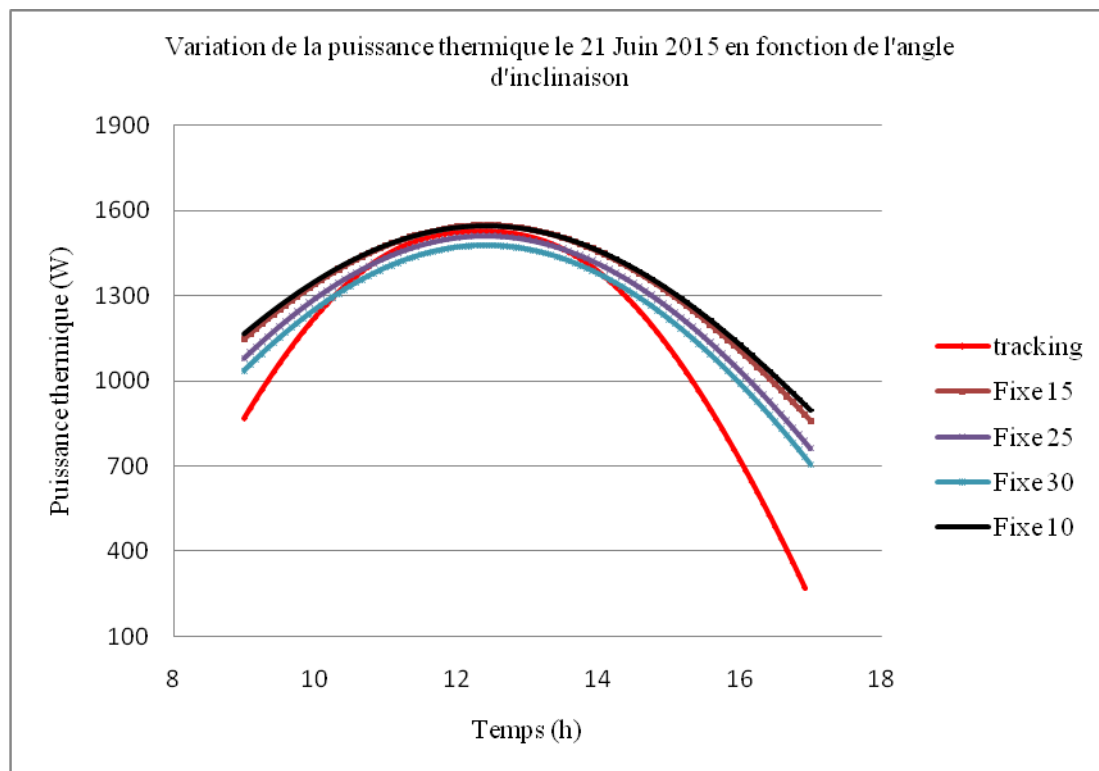


Figure 2 : production thermique d'un PTC fixe le 21 Juin 2015 en fonction de l'angle d'inclinaison

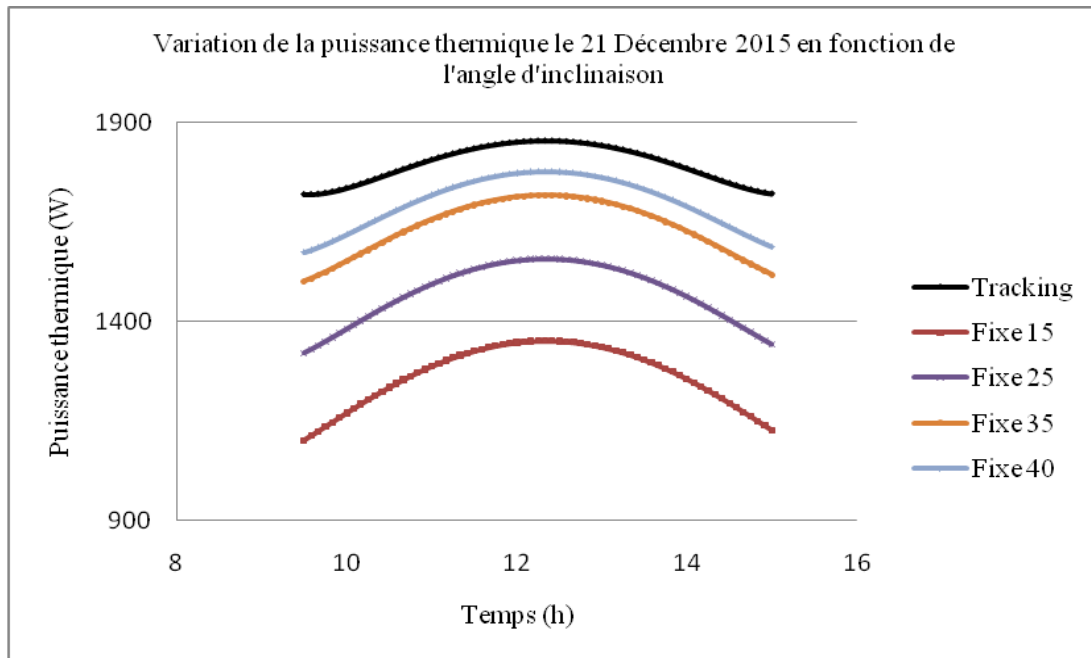


Figure 3 : production thermique d'un PTC fixe le 21 Décembre 2015 en fonction de l'angle d'inclinaison

Ces résultats peuvent être justifiés par le fait que pendant la période étalée entre le mois d'avril et d'août, la trajectoire du soleil dans le ciel est plus élevée par rapport aux autres moments de l'année. Par conséquent, le suivi solaire selon l'axe NORD-SUD devient moins influent sur la production thermique. En effet, le principe de fonctionnement d'un suivi solaire selon l'axe NORD-SUD, repose uniquement sur la variation de l'angle d'élévation du soleil et il ne tient pas compte de la variation de l'azimut. Et vu que le soleil, dans cette période de l'année, se trouve quasiment dans le plan méridien, alors le concentrateur n'est pas tout le temps en face du soleil. C'est pour cette raison qu'il ne reçoit pas tout le rayonnement direct. Par contre, si le suivi solaire s'effectue selon l'axe EST-OUEST le concentrateur sera en face de la direction du soleil et la variation de l'angle d'inclinaison sera suffisante pour améliorer les performances thermiques de l'installation.

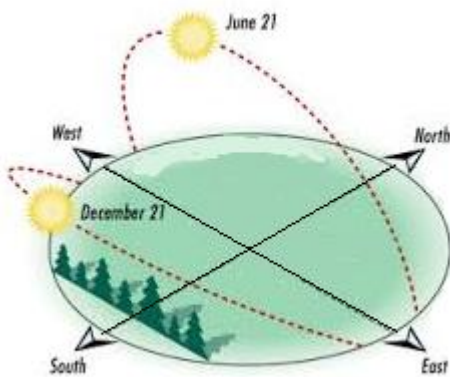


Figure 4: trajectoire solaire

2. Variation de la consommation électrique et de la puissance thermique en fonction du pas horaire

Le paramètre le plus important qui caractérise le système de suivi solaire astronomique est le « **pas horaire** », qui va s'incrémenter régulièrement à l'instant t_i pour calculer la nouvelle position du soleil et réorienter l'installation vers la position optimale, afin de maximiser la captation du rayonnement direct.

Les résultats des simulations numériques que nous avons obtenus ont montré que plus le pas horaire est petit plus la production thermique est importante ; car, en réduisant ce paramètre le concentrateur cylindro-parabolique reçoit en continu un flux maximal du rayonnement direct durant toute la journée. En revanche, en augmentant le pas horaire, le collecteur aura toujours un décalage par rapport à la nouvelle position du soleil ce qui augmente l'angle d'incidence. Par conséquent, le concentrateur recevra moins de rayonnement solaire direct et la production thermique sera moins importante et convergera, au fur et à mesure l'augmentation du pas horaire, vers la production d'une installation fixe.

Ainsi, la figure 5 montre clairement que la production thermique diminue avec l'augmentation du pas horaire.

A partir de la même figure, nous pouvons remarquer aussi qu'il y a un point d'inflexion à partir de laquelle, la production thermique devient quasi-constante. Pour justifier le choix de ce point qui représentera le pas horaire optimal, il faut d'abord étudier l'impact de la réduction du pas horaire sur la consommation électrique de l'installation ; en effet, si le pas horaire est plus petit, l'installation effectuera et commandera

le moteur continûment durant toute la journée, ce qui augmente la consommation électrique.

Cependant, les résultats issus des simulations numériques ont montré que cette consommation électrique reste inférieure au gain thermique net généré dans le cas d'un pas horaire plus petit.

La figure 6 représente la variation du gain thermique net qui est égal à la production thermique moins la consommation

électrique. A partir de cette figure, nous pouvons déceler plus clairement le point d'inflexion qui présente un compromis entre la production thermique et la consommation électrique ; en effet, ce point coïncide avec un pas horaire qui est égal à 10 min.

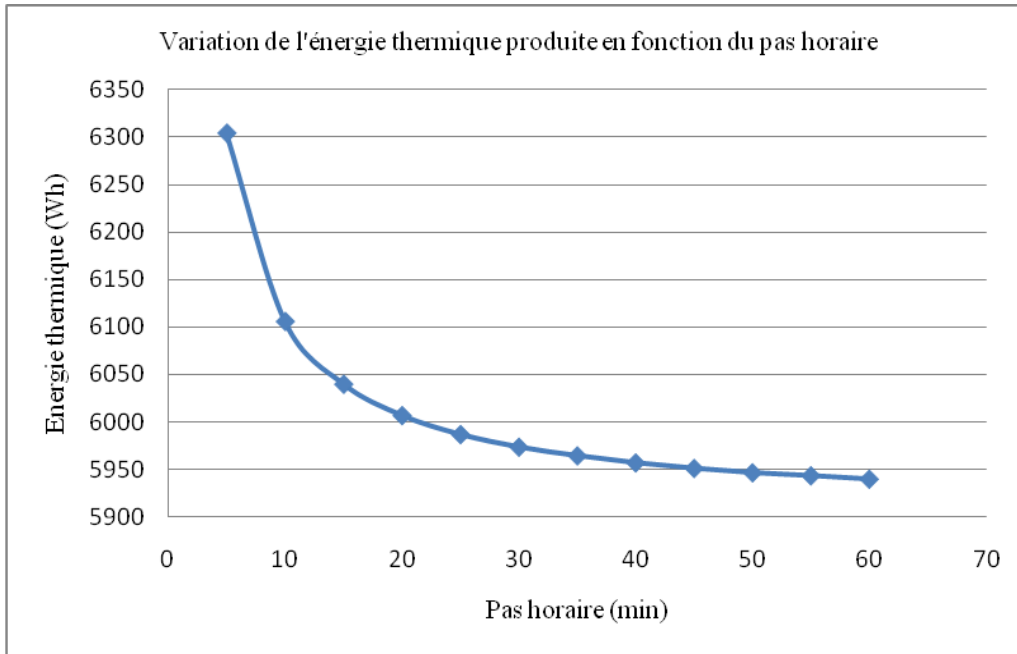


Figure 5: variation de l'énergie thermique produite en fonction du pas horaire

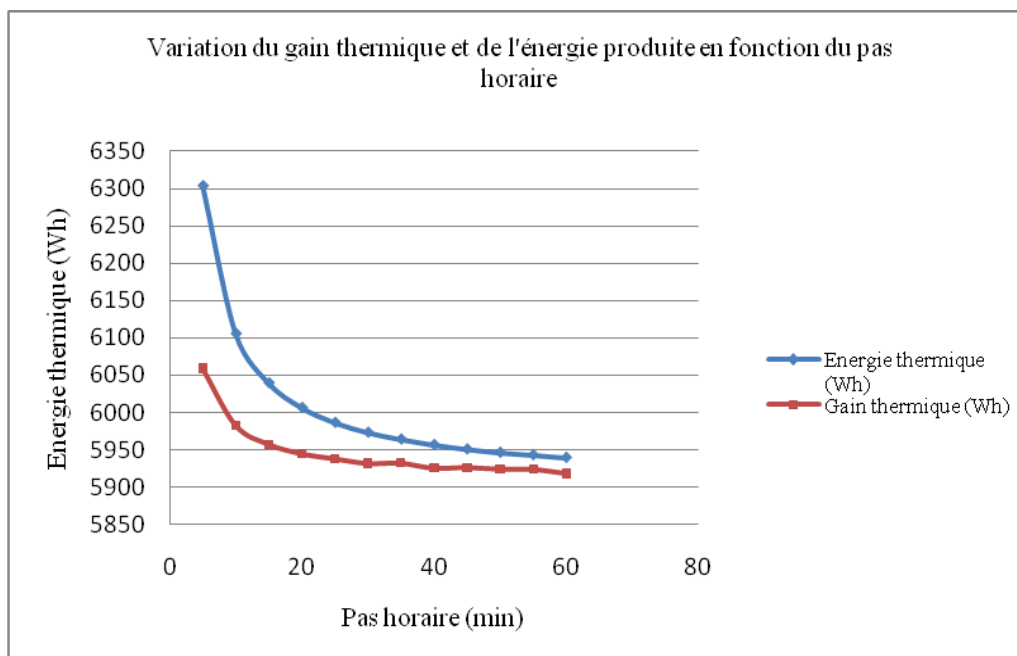


Figure 6: variation du gain thermique et de l'énergie produite en fonction du pas horaire

VII. CONCLUSION

L'objectif de ce travail était, d'une part, d'analyser l'impact d'un suiveur solaire astronomique sur les performances thermiques d'une installation solaire à concentrateur cylindro-parabolique dans la région de Tanger et, d'autre part, d'identifier le pas horaire optimal qui permettrait d'obtenir le meilleur compromis entre la consommation électrique de l'installation et ses performances thermiques. Pour ce faire, un modèle théorique a été élaboré et plusieurs simulations numériques ont été réalisées sur Matlab. À partir des résultats obtenus, nous pouvons établir les conclusions suivantes :

- Pendant la période d'été, le suivi solaire selon l'axe NORD-SUD est moins performant qu'une configuration fixe avec un angle d'inclinaison qui varie entre 5° et 25° . En revanche, il est plus performant pendant l'hiver.

- La puissance thermique d'une installation solaire thermodynamique à concentrateur cylindro-parabolique, diminue avec l'augmentation du pas horaire et vice versa.
- Il existe un pas horaire autour de 10° qui permet d'avoir des performances optimales.

RÉFÉRENCES

- [1] Roth P, Georgiev A, Boudinov H. *Cheap two-axis sun following device*. Energy Conversion and Management 2005;46:1179–92.
- [2] Hossein Mousazadeh, Alireza keyhani, Arzhang Javadi, Hossein Mobli, Karen Abrinia, Ahmed Sharifi, *A review of principle and sun tracking methods for maximizing solar systems output*. Renewable and sustainable energy reviews. 2009.
- [3] Jean MEEUS, *Astronomical algorithms*. Willmann-BELL, INC. deuxième édition, 1998.pp.59-193.
- [4] A. El Fadar, A. Mimet, M. Pérez-García, *Modelling and performance study of a continuous adsorption refrigeration system driven by parabolic trough solar collector*. Solar Energy 83 (2009) pp. 850–861.