



# Etude thermodynamique d'une centrale thermique a concentration solaire

BENRAMDANE Mohammed \*<sup>1</sup>, ABOUDI Saïd <sup>2</sup>, GHERNAOUT MEA <sup>1</sup>, ALIANE Abdennour <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire ETAP, Département de Génie mécanique, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire ICB-COMM-Site UTBM, 90010 Belfort Cedex, France

\* Corresponding author E-mail: benramdane2006@yahoo.fr

## Résumé —

Le monde est témoin, depuis plus d'un siècle, d'un important changement économique ; le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique.

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale. Ces technologies se basent sur des collecteurs qui concentrent la radiation solaire et réchauffent à haute température un fluide caloporteur.

Une centrale solaire thermodynamique à concentration est une centrale qui concentre les rayons du soleil à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur qui permet en général de produire de l'électricité.

Ces centrales connaissent un développement important malgré leurs limites, elles présentent un avantage majeur par rapport au photovoltaïque : elles peuvent (optionnellement) stocker la chaleur qu'elles produisent pour pouvoir continuer à fonctionner plusieurs heures après le coucher du soleil.

Afin d'optimiser l'investissement, la gestion opérationnelle et le rendement de telle installations, nous avons établi une étude thermodynamique pour mettre en valeur l'importance du choix des variables opérationnelles de la conversion énergétique avec ses différentes procédures et processus.

**Mots Clés** — Installation thermique solaire, tour solaire, turbine à vapeur, étude thermodynamique, rendement thermique.

## I. INTRODUCTION

Les intérêts d'une mobilisation de plus en plus importante des énergies renouvelables, et de l'énergie solaire de concentration en particulier, sont immenses et toucheront,

certainement d'une façon différenciée, tous les pays et auront un impact bénéfique sur l'ensemble de la biosphère. Pour les uns, il y aura les possibilités d'investissements, d'exportations de technologies et de savoir-faire, ainsi que la garantie de couverture durable des besoins en énergies par des vecteurs propres à des prix stables.

## II. CENTRALE THERMIQUE À CONCENTRATEUR SOLAIRE

Une centrale thermodynamique est une installation qui convertit l'énergie thermique en un travail mécanique suivant un cycle thermodynamique. Afin d'optimiser le rendement de ces installations, nous avons établi une étude paramétrique pour mettre en valeur l'importance du choix des variables opérationnelles de la conversion avec ses différentes procédures et processus. [1]

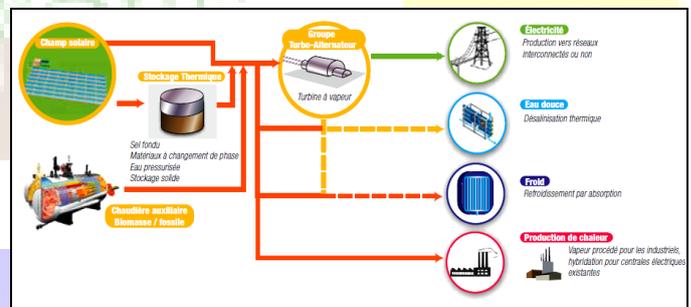


Fig. 1 Schéma de principe d'une centrale solaire à concentration

## III. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. , le récepteur absorbe l'énergie réfléchiée par le miroir et la transfère au fluide thermodynamique. Ce fluide étant à hautes température et pression fait tourner une turbine pour l'obtention de l'énergie mécanique, qui sera à la suite utilisée pour des besoins industriels [2] [3].

Nous voyons alors que pour la conversion de l'énergie solaire à une énergie mécanique facilement exploitable, nous passons par deux étapes :

- La conversion thermo-solaire ;
- La conversion thermodynamique



Parmi les divers systèmes utilisables pour produire un travail utile par voie thermodynamique, les systèmes à tour solaire sont les plus intéressants, dû à leur exploitation et concentration de l'énergie solaire. Le concept du récepteur solaire central est l'approche privilégiée pour atteindre des températures élevées dans les grandes installations adapté pour générer de l'énergie électrique ou la chaleur industrielle [4].

Toute fois leur conception demande une soigneuse étude thermodynamique afin d'obtenir un rendement satisfaisant [5]. Une centrale solaire thermodynamique est un ensemble d'équipements conçu dans le but de produire un travail, à partir de l'énergie solaire et après un procédé thermodynamique [6].

Les fluides de travail du système sont :

- un fluide caloporteur, qui transmet l'énergie solaire ;
- un fluide thermodynamique, qui circule dans l'installation de production.

#### IV. CYCLES THERMODYNAMIQUES

Le travail des centrales solaires thermoélectrique est de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Cette transformation se fait le plus souvent de manière tout à fait conventionnelle grâce à une turbine à vapeur d'eau couplée à un alternateur.

Dans le but de produire un travail utile la maîtrise de la conversion thermodynamique des différents aspects de l'énergie est nécessaire, il en existe plusieurs façons de le faire. [7]

##### A. Cycle de RANKINE

Le cycle de RANKINE est le transformateur thermomécaniques le mieux connu parce qu'il est le plus anciennement mis en œuvre par l'industrie moderne.

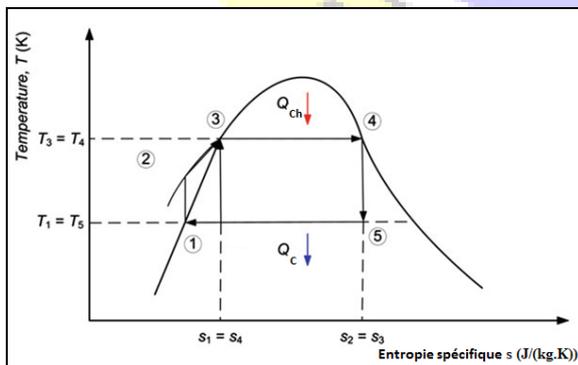


Fig. 2 Diagramme de température et entropie spécifique, du cycle de RANKINE

##### B. Le Cycle de HIRN

Le cycle de HIRN simple est basé sur quatre processus réversibles comme le montre la Figure 3. Le fluide le plus couramment utilisé dans ce cycle est de l'eau.

Sur le cycle de HIRN on constate qu'à la sortie de la turbine la vapeur est humide, ce qui endommage les aubes de la turbine. Afin de contourner le problème on surchauffe la vapeur saturée à des températures plus élevées.

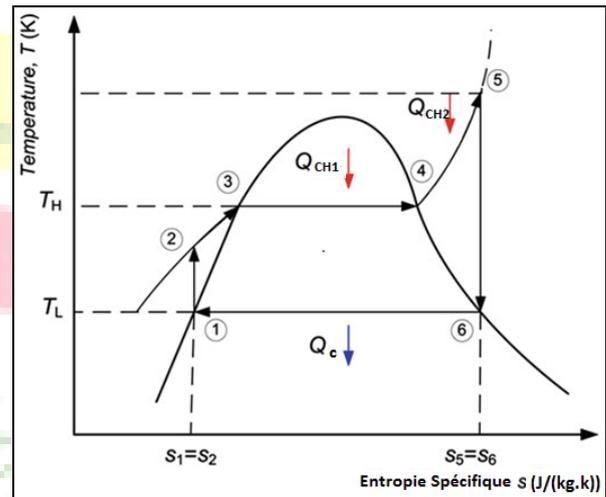


Fig. 3 Diagramme T-s du cycle de HIRN

##### C. Cycle de HIRN avec Surchauffe

La configuration précédente apporte un nouveau problème qui est l'augmentation de la température d'entrée à la turbine. La solution est de détendre la vapeur à une pression intermédiaire et la réchauffer.

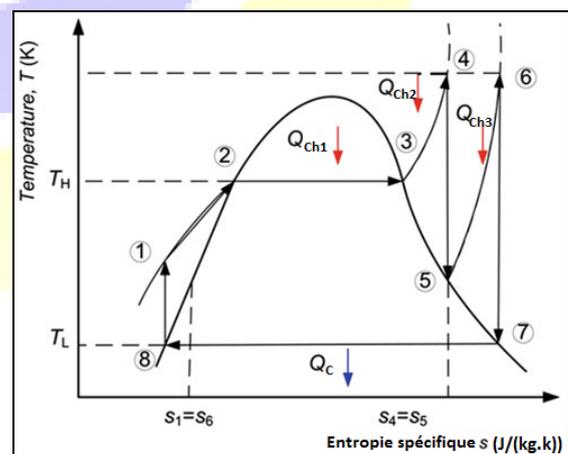


Fig.4 Diagramme T-s du cycle de HIRN avec surchauffe



## V. ETUDE THERMODYNAMIQUE

Dans l'intérêt de convertir l'énergie solaire concentrée en énergie thermique, puis mécanique suivant un cycle thermodynamique, pour qu'elle soit finalement disponible à des fins variées.

Afin d'étudier les paramètres thermodynamiques, dans le but de perfectionner le rendement thermodynamique de l'installation, des changements ont été fait sur le cycle RANKINE de l'implantation énergétique.

### • Bilans thermiques

#### 1. Cycle de RANKINE

Le cycle de RANKINE fonctionne suivant les quatre transformations comme le montre la figure 2 :

D'après le premier principe de la thermodynamique, les bilans énergétiques de chaque élément nous donnent les équations suivantes :

$$q_{ch} = h_4 - h_2 \quad (1)$$

$$q_c = h_5 - h_1 \quad (2)$$

$$w_p = h_2 - h_1 \quad (3)$$

$$w_t = h_4 - h_5 \quad (4)$$

$$w_u = w_t - w_p = q_{ch} - q_c \quad (5)$$

Le rendement se calcule comme suit :

$$\eta = \frac{w_u}{q_{ch}} = \frac{q_{ch} - q_c}{q_{ch}} \quad (6)$$

En remplaçant les équations (1) et (2) dans l'expression du rendement, nous obtenons :

$$\eta = \frac{h_4 - h_2 - (h_5 - h_1)}{h_4 - h_2} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{h_4 - h_2 - (h_5 - h_1)}{h_4 - h_2 + h_1 - h_1} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{h_4 - h_5 - (h_2 - h_1)}{h_4 - h_1 - (h_2 - h_1)} \quad (9)$$

$$w_p = h_2 - h_1 = v \cdot dP \quad (10)$$

Il en résulte l'expression finale du rendement :

$$\eta = \frac{h_4 - h_5 - v \cdot dP}{h_4 - h_1 - v \cdot dP} \quad (11)$$

#### 2. Cycle de HIRN

Le cycle de HIRN fonctionne suivant cinq transformations comme le montre la figure 3. :

D'après le premier principe de la thermodynamique, le bilan énergétique de chaque élément nous donne les équations suivantes :

$$q_{ch1} = h_4 - h_2 \quad (12)$$

$$q_{ch2} = h_5 - h_4 \quad (13)$$

$$q_{ch} = q_{ch1} + q_{ch2} = h_5 - h_2 \quad (14)$$

$$q_c = h_6 - h_1 \quad (15)$$

$$w_p = h_2 - h_1 \quad (16)$$

$$w_t = h_5 - h_6 \quad (17)$$

$$w_u = w_t - w_p = q_{ch1} + q_{ch2} - q_c \quad (18)$$

Le rendement se calcule comme suit :

$$\eta = \frac{w_u}{q_{ch}} \quad (19)$$

En remplaçant les équations (14) et (15) dans l'expression du rendement, nous obtenons :

$$\eta = \frac{h_5 - h_2 - (h_6 - h_1)}{h_5 - h_2} \quad (20)$$

$$\eta = \frac{h_5 - h_2 - (h_6 - h_1)}{h_5 - h_2 + h_1 - h_1} \quad (21)$$

$$\eta = \frac{h_5 - h_6 - (h_2 - h_1)}{h_5 - h_1 - (h_2 - h_1)} \quad (22)$$

Avec :  $w_p = h_2 - h_1 = v \cdot dP$

Il en résulte l'expression finale du rendement :

$$\eta = \frac{h_5 - h_6 - v \cdot dP}{h_5 - h_1 - v \cdot dP} \quad (24)$$

#### 3. Cycle de HIRN avec surchauffe

Bilans thermiques des différents éléments de l'installation figure 4. Sont :



- chaudière

$$q_{Ch1} = h_3 - h_1 \quad (25)$$

- surchauffeur

$$q_{Ch2} = h_4 - h_3 \quad (26)$$

- réchauffeur

$$q_{Ch3} = h_6 - h_5 \quad (27)$$

- chaleur totale

$$q_{Ch} = q_{Ch1} + q_{Ch2} + q_{Ch3} = h_6 - h_5 + h_4 - h_1 \quad (28)$$

- condenseur

$$q_C = h_6 - h_1 \quad (29)$$

- pompe

$$w_p = h_1 - h_8 \quad (30)$$

- turbine 1

$$w_{t1} = h_4 - h_5 \quad (31)$$

- turbine 2

$$w_{t2} = h_6 - h_7 \quad (32)$$

- turbine

$$w_t = w_{t1} + w_{t2} = h_4 - h_5 + h_6 - h_7 \quad (33)$$

- travail utile

$$w_u = w_t - w_p \quad (34)$$

$$\begin{aligned} w_u &= h_6 - h_7 + h_4 - h_5 - (h_1 - h_8) \\ &= h_6 - h_5 + h_4 - h_1 - (h_7 - h_8) \end{aligned} \quad (35)$$

$$w_u = q_{Ch} - q_C \quad (36)$$

La puissance nette totale du cycle W peut être obtenue selon

l'équation (37) :

$$W = \dot{m} \times w \quad (37)$$

Le rendement se calcule comme suit :

$$\eta = \frac{w_u}{q_{Ch}} = \frac{q_{Ch} - q_C}{q_{Ch}} \quad (38)$$

$$\eta = 1 - \frac{h_7 - h_8}{h_6 - h_5 + h_4 - h_1} \quad (39)$$

## VI. CONTRAINTES DE TRAVAIL

Deux méthodes sont utilisables pour le calcul des différents paramètres thermodynamiques : T, P, v, h et s :

- Méthode graphique : utilisation des diagrammes de Mollier (h, s), Clapeyron (P, v) et enthalpique (T, h) ;

- Méthode analytique : utilisation des tableaux des propriétés thermodynamiques de l'eau liquide, liquide saturé, humide, vapeur saturée et vapeur surchauffée.

Notre choix était de travailler avec les tables des paramètres thermodynamiques (méthode analytique) extraits des équations empiriques, à cause de leur précision.

### • Haute pression

La pression de la chaudière, qui est celle de la sortie de la pompe, est prise égale à la pression de saturation de la solution liquide à la température d'évaporation.

### • Basse pression

La pression basse dans le condenseur, qui est celle de la sortie de la turbine, est égale à la pression de saturation du fluide à la température de condensation.

### • Températures

La chaudière et le surchauffeur à haute pression sont alimentés en parallèle, par une seule source de chaleur qui n'est d'autre que l'énergie solaire concentrée.

### • Hypothèses de travail

Le choix de la pression de travail varie entre 1 à 7 bars pour la basse pression et de 10 à 30 bars pour la haute pression, et la température de surchauffe varie entre 200 et 540°C.

L'intervalle de température est exigé, d'après l'installation de concentration solaire ; alors que la marge de pression dépend essentiellement des capacités des éléments de l'installation thermodynamique, la pompe et la turbine, nous choisissons des équipements simples et performants, satisfaisant les demandes en pression citées avant.

## VII. SIMULATION

### A. Courbes

#### • Cycle de RANKINE

- Influence de la basse pression

Pour étudier l'influence de la basse pression dans le cycle de RANKINE sur son rendement, on garde une haute pression constante et on fait varier les basses pressions :

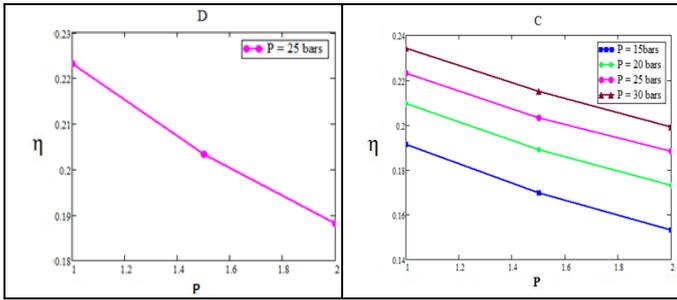


Fig. 5 Variation du rendement en fonction des basses pressions pour hautes pressions constantes

• Influence de la haute pression

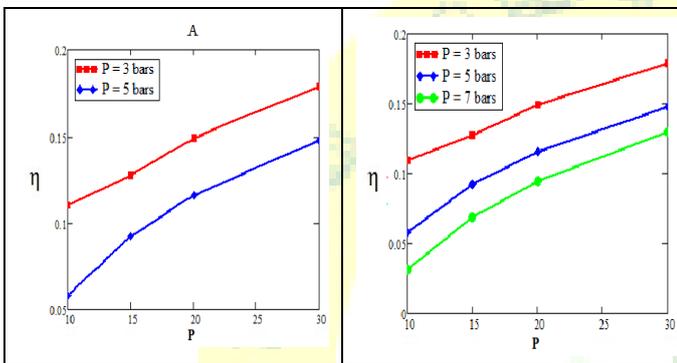


Fig. 6. Variation du rendement en fonction des hautes pressions avec basses pressions constantes

• Cycle de HIRN (variation de la température)

- Influence de la basse pression ( $P_B$ )
- $P_H$  constante

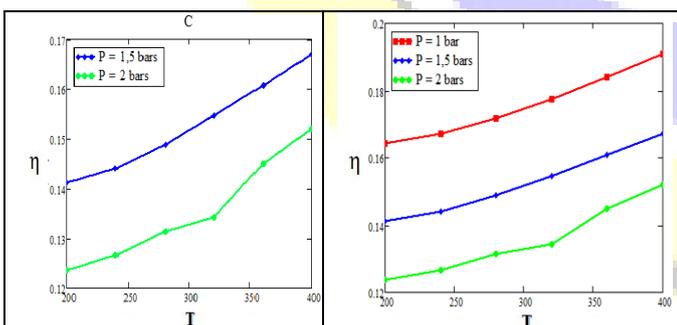


Fig. 7 Variation du rendement en fonction des températures pour avec basses pressions constantes

- Influence de la haute pression

- Pour  $P_B$  constante

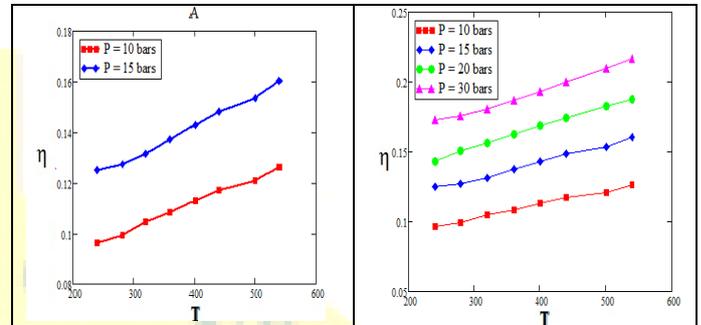


Fig. 8. Variation du rendement en fonction des températures pour avec hautes pressions constantes

**B. Interprétation des graphes**

• Cycle de RANKINE

Les figures (5) et (6) présentent la variation du rendement en fonction des pressions. La première figure (5) consiste à étudier l'influence du choix de la basse pression sur les performances du cycle de RANKINE, alors que la deuxième Figure (6) montre l'effet du choix de la haute pression sur le rendement de ce dernier.

Pour clarifier et valoriser nos résultats nous avons établi notre étude avec plusieurs valeurs constantes pour la haute pression dans la première partie et de la basse pression dans la dernière. Dans la première analyse, Figure (5), on a choisi une pression haute constante pour voir l'influence de la basse pression qu'on l'a fait varier, nous avons remarqué qu'à l'augmentation de cette dernière, le rendement évolue inversement.

La figure (6) illustre l'aspect de l'effet de la haute pression sur le rendement du cycle de RANKINE, ce qui nous a poussé à faire la deuxième analyse : l'influence de la haute pression sur les performances thermodynamiques.

Ainsi dit, nous avons établi la deuxième analyse, et à partir des résultats, nous avons confirmé ce que nous avons remarqué avant, l'évolution du rendement est directement proportionnelle à la variation de la haute pression.

• Cycle de HIRN

Les figures (7) et (8) présentent le sens de la variation du rendement thermique en fonction de la température de la



# Le 5<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 5<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2018



surchauffe pour une installation travaillant suivant le cycle amélioré de HIRN (cycle avec surchauffe).

Notre étude consiste à étudier l'influence de la basse pression ainsi que de la haute pression en fonction de la température de surchauffe sur les performances du cycle de HIRN. Systématiquement, notre travail se divise en deux parties.

Dans la première partie, nous avons choisi une valeur fixe de la haute pression figure (7), on a fait varier la température de surchauffe. Les résultats présentés dans les graphes de la figure (7) montrent nettement l'évolution du rendement en fonction de la température de surchauffe, plus la température est haute plus le cycle possède un rendement meilleur.

L'évolution du rendement est proportionnelle à la variation de la température de surchauffe et inversement proportionnelle à la variation de la basse pression.

La deuxième partie consiste à étudier l'influence du choix de la haute pression sur les performances de notre installation en fonction de la température de surchauffe.

On a choisi une valeur fixe de la basse pression, on a fait varier la haute pression, on constate l'évolution du rendement dans graphes présentés dans la figure (8) en fonction de la température de surchauffe.

### VIII. CONCLUSIONS

Notre étude met en valeur le sens de la variation du rendement thermique en fonction de la basse et haute pression pour une installation travaillant suivant le cycle de RANKINE.

Aussi, nous avons étudié et présenté le sens de la variation du rendement thermique en fonction de la température du surchauffe pour une installation travaillant suivant le cycle de HIRN.

Nous remarquons d'une part, pour le cycle de RANKINE qu'à l'augmentation de la basse pression, le rendement décroît pour toutes les valeurs de la haute pression, d'autre part ceci est vérifié pour le cycle de HIRN.

Dans le but de perfectionner le fonctionnement d'une implantation solaire thermique et dans le cas où l'investissement est assez onéreux, nous pouvons nous permettre d'ajouter une autre turbine qui effectue la détente des vapeurs après qu'elles soient réchauffées à la sortie de la première turbine ; comme il est claire c'est le fonctionnement du cycle thermodynamique de HIRN avec resurchauffe ; ceci nous permettra à la suite d'extraire plus de travail utile, sans

atteindre de très hautes températures qui augmentent le risque d'endommager des turbines, autrement dit, la réduction de la durée de vie de cette dernière et la demande incessante en maintenance.

### NOMENCLATURE

<b>Symboles :</b>	$q_{ch2}$ : Chaleur massique du surchauffeur,
$h_i$ : Enthalpies massique des différents points,	$w_U$ : Travail massique utile, [kJ/kg]
$q_{ch}$ : Chaleur massique de chaudière, [kJ/kg] ;	P : Pression [bar]
$q_c$ : Chaleur massique de condenseur, [kJ/kg] ;	<b>Lettres grecques :</b>
$W_p$ : Travail massique de pompe, [kJ/kg].	$\eta$ : Rendement thermique
$v$ : volume massique, [m <sup>3</sup> /kg].	
$m$ : débit massique [Kg/s]	

### REFERENCES

- [1] Francis Meunier Aide-mémoire Thermodynamique de l'ingénieur Dunod, Paris, 2004.
- [2] [Http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_thermal\\_collector](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_collector), consulté le 06 avril 2017.
- [3] [Http://www.connaissance-des-energies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation](http://www.connaissance-des-energies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation), consulté le 10 février 2017
- [4] Solar Thermal Power Plants Achievements and Lessons Learned, Exemplified by the SSPS Project in Almeria/Spain.
- [5] S. M. Metev and V. P. Veiko, Laser Assisted Microtechnology, 2nd ed., R. M. Osgood, Jr., Ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998.
- [6] Thermodynamique Document rédigé par Olivier BONNEFOY 2.6 du 7 novembre 2014 publié par Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- [7] [Www. Wikipédia.com](http://www.wikipedia.com), consulté le 10 octobre 2017.