

CONCENTRATEUR SOLAIRE ET PRODUCTION ÉLECTRIQUE



Étudiants :

Justine ABGRALL

Najla BEN YOUSSEF

Rémi GROSGEORGE

Maxime HEGO

Matthieu LEVACHER

Marion SCHAEFFER

Enseignant-responsable du projet :

Jamil ABDUL AZIZ

Date de remise du rapport : **19/06/2017**

Référence du projet : **STPI/P6/2017 – 42**

Intitulé du projet : **CONCENTRATEUR SOLAIRE ET PRODUCTION ÉLECTRIQUE**

Type de projet : **Théorique, étude de cas, expérimental**

Objectifs du projet:

- **Comprendre le fonctionnement des centrales solaires et les méthodes de concentration solaire jusqu'à la production d'énergie électrique**
- **Étudier l'aspect économique, social, environnemental...**
- **Étude de cas et réalisation d'expériences : cas concret et comparaison de la théorie à la réalité, à petite échelle.**

Mots-clefs du projet: **Solaire, énergie verte, cohésion, autonomie**

TABLE DES MATIERES

Introduction / Méthodologie	5
1. Concentrateur solaire	7
1.1. Partie théorique.....	7
1.1.1. Présentation générale des concentrateurs	7
1.1.2. Implantation des centrales et zones privilégiées.....	8
1.1.3. Concentration des rayons solaires (optique géométrique).....	9
1.1.4. Facteur de concentration.....	10
1.1.5. Types de rayonnements.....	10
1.1.6. Coefficient de réflexion.....	11
1.2. Partie expérimentale	11
1.2.1. Expérience 1 (28/03/2017 et 02/05/2017).....	11
2. Production Électrique	13
2.1. Partie théorique.....	13
2.1.1. Principe et cycle de Carnot.....	13
2.1.2. Le cycle de Rankine	14
2.1.3. Le cycle de Stirling	15
2.1.4. Les fluides caloporteurs et thermodynamiques.....	16
2.1.5. Comparaison et avantage de la production électrique par des concentrateurs solaires.....	17
2.2. Partie expérimentale	18
2.2.1. Expérience 2 (02/05/2017)	18
2.2.2. Expérience 3 (30/05/2017)	19
3. Aspects historique, économique, social et environnemental	20
3.1. Aspect historique.....	20
3.2. Aspect économique.....	21
3.3. Aspect social	22
3.4. Aspect environnemental	23
4. Étude de cas : Planta Solar 10, Sanlúcar la Mayor, Espagne	24
4.1. Présentation	24
4.2. Description technique.....	24
4.3. Situation économique et sociale de la centrale.....	25
4.4. La politique de développement de l'énergie solaire en Espagne.....	25
Conclusion	26
Bibliographie – Sitographie – Crédits d'illustration.....	27
Annexe (Bilan de projet).....	32

INTRODUCTION

Dans le cadre de notre formation à l'INSA de Rouen, nous avons dû réaliser un projet P6 en groupe de 6 étudiants. Ce projet n'est pas le premier travail de groupe que nous avons réalisé pendant nos deux premières années à l'INSA. Tous les projets ainsi réalisés nous permettent d'acquérir de nouvelles expériences du travail de groupe dans différents domaines, ce qui est important pour de futurs ingénieurs.

Plusieurs sujets nous étaient proposés, et nous avons choisi le suivant : "Concentrateur solaire et production électrique". Ce thème nous attirait tous, car les énergies solaires sont aujourd'hui une alternative aux énergies fossiles qui font énormément débat dans notre société, dans un monde de plus en plus pollué. Néanmoins, peu d'entre nous connaissaient correctement les concentrateurs solaires car aujourd'hui ce sont plutôt les panneaux photovoltaïques qui sont répandus en France.

L'avantage principal de notre projet est qu'il permet de lier la théorie à la pratique. Nous avons divisé le travail en commençant d'abord par la partie théorique, pour s'informer sur les concentrateurs solaires et leur production électrique, puis nous avons réalisé la partie expérimentale à l'INSA qui nous a fourni un miroir concave et tout le matériel nécessaire au bon déroulement de nos expériences.

Le projet se décompose en trois parties. La première décrit les concentrateurs solaires et les différents types existant. Ensuite, la seconde partie concerne la production électrique selon différentes méthodes. La partie suivante renseigne les aspects historiques, économiques, sociaux et environnementaux des concentrateurs. Enfin, en dernière partie se trouve notre étude de cas concernant la centrale solaire PS10 de Sanlúcar la Mayor, près de Séville.

MÉTHODOLOGIE

Nous allons commencer par aborder la méthodologie que nous avons adoptée tout au long du projet. Lors des premières séances, nous avons pris le temps de faire connaissance mais également de planifier tout ce que nous ferions dans les séances à venir, en particulier le temps accordé à chaque tâche.

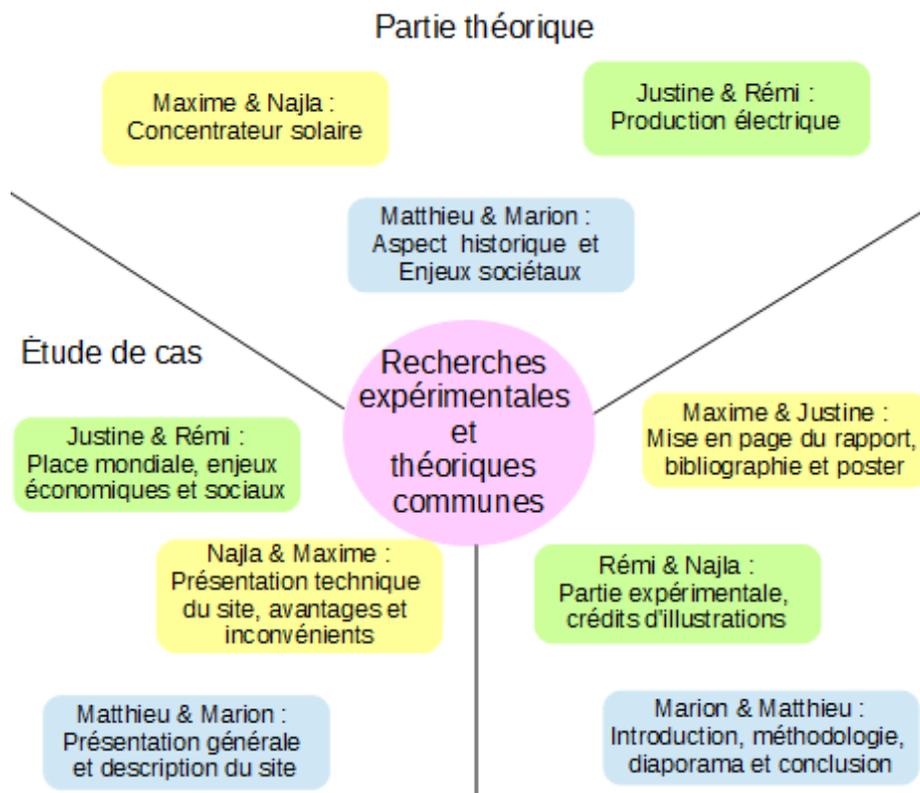
Une fois cette organisation terminée, nous avons décidé de tous nous renseigner sur l'ensemble du sujet pour que nous soyons tous en capacité de comprendre tous les aspects et de pouvoir répondre à toutes les questions éventuellement posées. Suite à cela, Monsieur Abdul Aziz a effectué un petit "contrôle" de nos connaissances théoriques en nous posant quelques questions.

Nous nous sommes enfin répartis les différentes parties pour la rédaction théorique comme présenté dans le diagramme ci-dessous.

Lorsque nous avons commencé les expériences, nous avons choisi de les réaliser ensemble et également de rédiger ensemble les protocoles. Rémi et Najla se sont occupés des comptes rendus.

Concernant l'étude de cas, nous nous sommes tous renseignés puis nous avons partagé la rédaction, comme nous l'avons à nouveau présenté dans le diagramme ci-dessous.

Enfin, Marion et Matthieu ont rédigé l'introduction, la conclusion et ont réalisé le diaporama. Justine et Maxime se sont occupés du poster et de la mise en page de ce rapport.



Il y a tout de suite eu une bonne entente dans le groupe, et cela s'est poursuivi tout au long du projet. Il a donc été très agréable de travailler ce sujet car tous les membres étaient impliqués et volontaires.

1. CONCENTRATEUR SOLAIRE

1.1. Partie théorique

1.1.1. Présentation générale des concentrateurs

Un **concentrateur solaire** est un système qui oriente les flux de photons provenant du Soleil au moyen de miroirs, en un point ou sur une ligne, permettant d'atteindre des températures très élevées (supérieures aux systèmes classiques non concentrés). À partir de cette chaleur, il est possible de produire de l'électricité ou de chauffer de l'eau. D'autres utilisations pratiques de ces dispositifs peuvent être le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou la production d'hydrogène. On distingue quatre types de concentrateurs, avec différents facteurs de concentration (cf 1.1.4) :

- **À concentration linéaire**

Centrales à miroirs cylindro-paraboliques

C'est la technologie la plus utilisée aujourd'hui. Des miroirs en forme de demi-cylindre, suivant les mouvements du Soleil, concentrent ses rayons en un axe, foyer du demi-cylindre. À cet endroit circule un fluide caloporteur atteignant jusqu'à 500°C, utilisé pour chauffer de l'eau ou un gaz, entraînant une turbine, produisant de l'électricité.
Ex : Andasol, Espagne (150 MW); Nevada Solar One, États-Unis (64 MW)



Récepteur mobile – $\alpha_{\text{concentration}}$ 70-80



Récepteur fixe – $\alpha_{\text{concentration}} > 60$

Centrales solaires à miroirs de Fresnel

Encore peu répandus, ces centrales fonctionnent sur le même principe que les miroirs cylindro-paraboliques, mais ceux-ci sont moins incurvés et placés au sol, tandis que l'axe-foyer est suspendu au-dessus de ces miroirs. Moins chers à produire, ils ont aussi un rendement plus faible du fait de l'image "dégradée" renvoyée par ces miroirs moins incurvés. *Ex: Puerto Errado, Espagne (31,4 MW); Kimberlina, Californie (5 MW)*

- **À concentration au foyer**

Centrales à tour

Elles concentrent les photons renvoyés par les "héliostats" (miroirs orientés de façon à suivre le Soleil) en un récepteur de faible dimension, assimilable à un point à l'échelle de la centrale. Il y circule un fluide caloporteur, qui suit un cycle thermodynamique vapeur ou gaz classique permettant de produire de l'électricité. Ces centrales sont très efficaces mais sont aussi des plus chères, en raison de la construction de la tour.
Ex: Crescent Dunes, Nevada (110 MW) Solar Tres, Espagne (19,9 MW); Projet PEGASE sur le centre de Thémis (Pyrénées-Orientales)



Récepteur fixe – $\alpha_{\text{concentration}} > 1000$



Récepteur mobile – $\alpha_{\text{concentration}} > 1300$ ¹

Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling

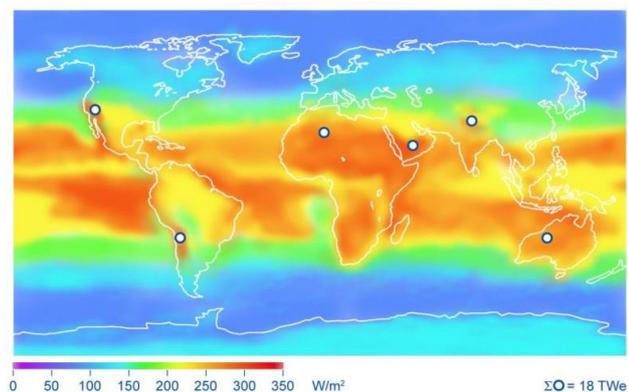
Un miroir sphérique concave réfléchit le rayonnement en le concentrant en son point focal, chauffant ainsi un gaz dans un circuit fermé. Ce gaz chaud actionne un piston, produisant du travail, converti en électricité. Ce dispositif est en fait un moteur dit "Dish-Stirling". En retard de développement car coûteux, il est plutôt destiné à des endroits isolés et n'est pas aujourd'hui adapté à une production industrielle.

Ex: lieu de recherches du CNRS, Font-Romeu Oreillo

Précision sur les **héliostats** (ou trackers solaires) : c'est un dispositif qui sert à projeter les rayons du soleil en un point ou une surface fixe à l'aide de miroirs. Il est constitué d'un miroir muni d'un moteur qui suit l'orientation du soleil, grâce à un pyréliomètre suivant le maximum d'ensoleillement direct. Le dispositif tourne autour de deux axes : l'axe vertical, dit azimut, et l'axe horizontal, dit d'élévation. Un héliostat est généralement utilisé dans les centrales solaires thermiques à concentration pour augmenter la production d'électricité de plus de 45% ou par ailleurs pour détecter des rayons cosmiques. De plus, dans le cas d'une centrale à tour, sans héliostat, aucune concentration sur un récepteur n'est possible. Similairement, un miroir parabolique doit suivre le mouvement du Soleil pour pouvoir concentrer efficacement les rayons sur son point focal.

1.1.2. Implantation des centrales et zones privilégiées

La production des différentes centrales à concentration solaire précédemment citées est évidemment liée à leur **ensoleillement**. Ce dernier n'est pas uniformément réparti à la surface de la Terre : il se concentre davantage sur une bande Nord-Sud de 10 000 kilomètres environ, centrée sur l'équateur. La carte montre les ressources thermiques à la surface terrestre (en W/m^2) :



Répartition des ressources thermiques d'origine solaire dans le monde

L'énergie solaire étant, à l'échelle de la vie humaine, une ressource quasi illimitée (une énergie renouvelable), ces régions très ensoleillées représentent **un véritable potentiel** en termes de développement de ces technologies de concentrateurs solaires. L'ensoleillement est supérieur à 2000 kWh/m²/an dans les zones les plus adéquates à l'utilisation de l'énergie solaire. Les meilleurs sites reçoivent un rayonnement solaire de 2800 kWh/m²/an.

Il faut notamment qu'il y ait de grandes quantités d'eau à disponibilité pour nettoyer les miroirs ou autres éléments optiques. Une centrale à tour d'une puissance de 50 MW consomme environ 300 000 m³ d'eau chaque année. Il est donc plus difficile de concilier important ensoleillement et réserves d'eau.

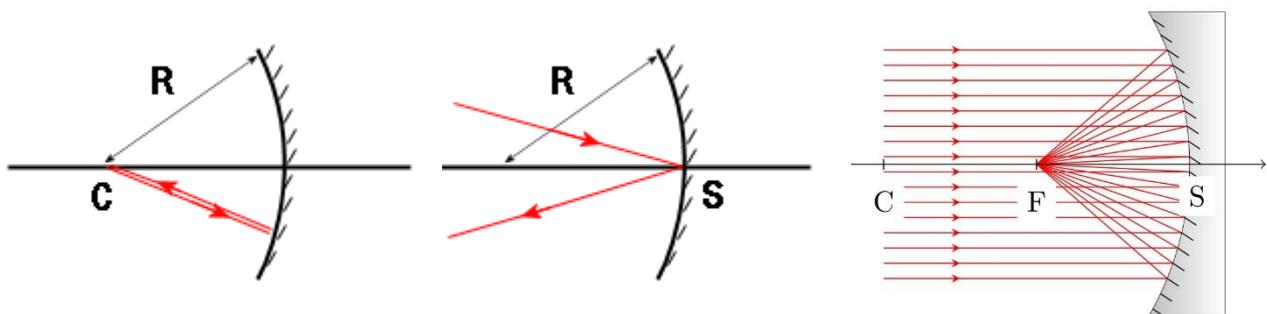
¹ : selon le tableau comparatif de l'Irena (The International Renewable Energy Agency)

Actuellement, la grande majorité des centrales à concentration solaire en fonctionnement est située dans deux pays : l'Espagne et les Etats-Unis; les autres pays étant ceux du Maghreb, du Moyen-Orient, l'Australie, l'Inde, l'Afrique du Sud... Toutefois, ces centrales continuent de se développer et sont déjà en construction dans d'autres pays, notamment dans les pays émergents. Notons par exemple huit projets en Chine, trois en Inde ainsi que deux autres en Afrique du Sud et au Maroc. Cela montre bien que ce n'est pas forcément l'ensoleillement qui justifie l'implantation des centrales (par exemple l'Espagne ne fait pas partie des plus ensoleillées), mais bien des motifs économiques, sociaux, environnementaux et politiques, qui seront développés un peu plus tard dans ce dossier.

Sur un plan technique, la maîtrise du flux énergétique des photons issu de l'ensoleillement nécessite une étude d'optique géométrique, où l'on considère ce flux comme un ensemble de rayons, que l'on doit concentrer en un point.

1.1.3. Concentration des rayons solaires (optique géométrique)

Les miroirs sphériques et cylindriques utilisés pour les deux catégories de concentrateurs (linéaires et au foyer) sont des miroirs concaves. La différence entre les deux est que l'un n'a qu'un seul point focal, tandis que l'autre a une "ligne locale". Cependant, le principe et le modèle utilisés fonctionnent bien, puisque dans le cas d'une concentration linéique, il s'agit d'une coupe normale à cette "ligne locale". Voici quelques schémas d'optique géométrique et des définitions associées ² :



Le **centre C** : le centre du cercle qui décrit le miroir sphérique. C se trouve sur l'axe optique.

Le **sommet S** : L'intersection entre le miroir et l'axe optique. Le **rayon R** : $R = \overline{CS}$

Le **foyer principal image F'** : le point image d'un objet situé à l'infini, dont les rayons arrivent parallèles sur le système optique et parallèlement à son axe optique. Le plan passant par F' et perpendiculaire à l'axe optique du système est appelé plan focal image. La distance focale image : $f' = \overline{SF'}$

Le **foyer principal objet F** : le point objet d'une image située à l'infini, les rayons émergent du système optique parallèles entre eux et parallèles à l'axe optique. Le plan passant par F et perpendiculaire à l'axe optique du système est appelé plan focal objet. La distance focale objet : $f = \overline{SF}$

Les deux foyers principaux d'un miroir sphérique sont confondus et de même nature.

Relations de conjugaison :

$$\frac{1}{AS} + \frac{1}{A'S} = \frac{2}{SC}$$

$$\frac{1}{CA} + \frac{1}{CA'} = \frac{2}{CS}$$

$$\overline{FA'} \cdot \overline{FA} = \left(\frac{\overline{CS}}{2}\right)^2$$

Autre relation utile pour l'étude d'un miroir sphérique : $\overline{FS} = \frac{\overline{CS}}{2}$

² : Définitions et formules <http://www.physagreg.fr/optique-12-generalites-systemes-miroirs.php>
http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch03/co/apprendre_ch03_07.html

1.1.4. Facteur de concentration

L'optique géométrique théorique suggère que les miroirs sphériques concentrent les rayons en un point, or en pratique les miroirs ne sont pas parfaits et leur foyer ne peut être réduit à un point. Pour chacun des types de concentrateurs, le récepteur des rayons réfléchis a une surface. Le terme « **facteur de concentration** » est utilisé pour décrire à quel point un dispositif concentre l'énergie lumineuse. Il y a alors deux différentes définitions pour le facteur de concentration ³ :

- **Facteur de concentration optique**

C'est l'éclairement moyen I_r , intégré sur la surface du récepteur S_r , divisée par l'éclairement incident sur les miroirs I_0 :

$$\alpha_{co} = \frac{\frac{1}{S_r} \int I_r dS_r}{I_0}$$

- **Facteur de concentration géométrique**

C'est la surface des miroirs S_m divisée par la surface du récepteur S_r :

$$\alpha_{cg} = \frac{S_m}{S_r}$$

1.1.5. Types de rayonnements

Le rayonnement solaire défini précédemment, exprimé en W/m^2 , correspond à ce qu'on appelle le **rayonnement global**, pouvant être mesuré à l'aide d'un solarimètre. Il s'agit d'un ensemble de différents types de rayonnement :

- Le **rayonnement direct**, le plus puissant, est celui qui arrive directement, en traversant uniquement l'atmosphère (hors nuages). Il dépend de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon et donc de la saison, les régions proches de l'équateur étant plus ensoleillées donc privilégiées car les rayons lumineux parcourent moins de distance dans l'atmosphère à l'équateur, lorsque le soleil est au zénith, plutôt qu'aux pôles. On peut le mesurer avec un pyrhéliomètre, appareil de mesure différent du solarimètre.
- Le **rayonnement diffus** qui est le rayonnement provenant de l'ensemble de l'atmosphère et notamment celui diffusé par les nuages. Il est donc plus faible que le rayonnement direct puisque réparti sur la surface des nuages, puis diffusé dans toutes les directions.
- Le **rayonnement réfléchi** par le sol, les étendues d'eau, les arbres, les immeubles... Il dépend aussi de l'inclinaison du rayonnement et est plus faible que le rayonnement direct puisqu'il n'est qu'une partie du rayonnement initial qui a été absorbé ou transmis par la surface de réflexion.

Le rayonnement direct étant le plus puissant, il est évident que si l'on veut maximiser la puissance d'un concentrateur solaire, il faut avant tout compter sur ce rayonnement. Notons la cohérence avec la carte des ressources thermiques terrestres : les régions les plus ensoleillées se situent là où le rayonnement direct est le plus élevé, près de l'équateur et où la présence de nuages est très faible.

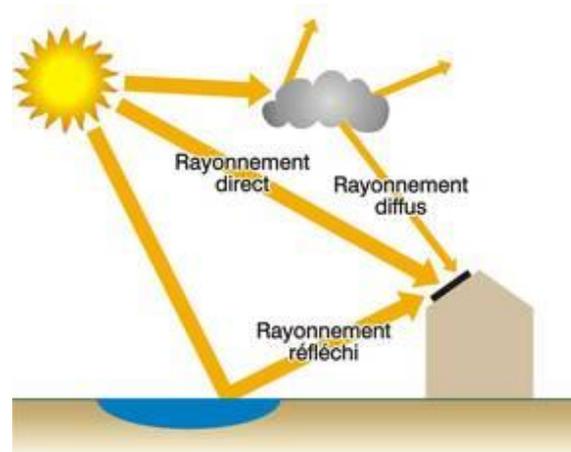


Schéma présentant les différents types de rayonnements solaires

³ : <http://www.enr.fr/energie-solaire-thermodynamique>
<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>

1.1.6. Coefficient de réflexion

Quand la lumière du soleil est interceptée par une paroi, une partie de la lumière est réfléchiée vers l'extérieur, une autre est absorbée par les matériaux et la partie qui reste est transmise à l'intérieur.

Coefficient de réflexion pour un miroir ⁴ :

$$\alpha_R = \frac{\mathcal{P}_{\text{réfléchiée}}}{\mathcal{P}_{\text{incidente}}}$$

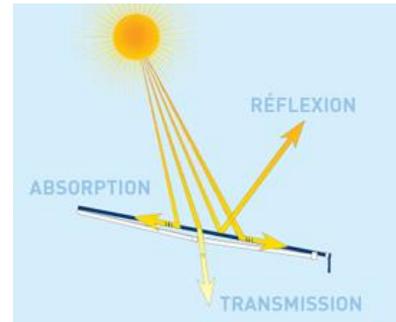


Schéma présentant les différentes interactions avec la matière

Ainsi, la totalité du rayonnement incident n'est pas réfléchi, mais un certain pourcentage qui dépend de la nature du matériau utilisé pour cette réflexion. Par exemple, l'or a un coefficient de réflexion de 0,741 (il réfléchit 74,1% du rayonnement incident), tandis que ceux de l'aluminium et l'argent sont respectivement de 0,915 et 0,951. Il est donc nécessaire de bien concilier à la fois ce coefficient, qu'il soit élevé, et le coût non négligeable des matériaux.

1.2. Partie expérimentale

1.2.1. Expérience 1 (28/03/2017 et 02/05/2017)

Le but de cette expérience est de déterminer le facteur de concentration d'un miroir concave.

Protocole :

- 1 - Positionner le miroir concave et la lampe de 75W sur l'axe optique et à une distance d'environ un mètre.
- 2- Déterminer le point focal image en déplaçant la feuille à l'aide d'une pince le long de l'axe optique du miroir. Le point focal se trouve à l'endroit où la tache lumineuse est la plus petite et brillante.
- 3- A l'aide du solarimètre, mesurer la puissance par m² dans le noir, lampe éteinte, puis l'allumer et mesurer à nouveau avant et après le point focal image (ne pas mettre le solarimètre au niveau du foyer). Calculer la différence entre les mesures lampe allumée et dans le noir.
- 4- Placer la feuille à petits carreaux au niveau du point focal image déterminé précédemment. La feuille peut être coloriée en noir afin de brûler plus vite. Une fois que la feuille a brûlé au niveau de la tache lumineuse, éteindre la lampe et stopper la brûlure de la feuille.
- 5- Mesurer la surface brûlée.
- 6- Calculer le facteur de concentration à partir de la surface du miroir et la surface de feuille brûlée.

Si la feuille ne brûle pas avec la lampe, reprendre depuis le 4- avec la lumière directe du Soleil en mesurant son éclairement au niveau du miroir à l'aide du solarimètre.

Résultats :

En déplaçant la feuille le long de l'axe optique on obtient une distance focale de : $f_{exp} = 41 \text{ cm}$. Les données constructeur du miroir donnent $f_{the} = 45 \text{ cm}$. Ainsi, le résultat est cohérent, mais un peu éloigné car l'incertitude relative $(f_{the} - f_{exp})/f_{the} = 8,9\%$ est élevée. Cette différence peut s'expliquer par un manque d'exactitude dû aux rayons solaires qui formaient des tâches étendues. La précision n'était donc pas optimale. L'utilisation d'un laser, dont la tâche formée est plus restreinte, aurait permis une meilleure mesure.

⁴ : <http://www.photoduciel.com/index.php/technique/14-revetement/7-reflexion-sur-un-metal-revetements-metalliques>

Le solarimètre dans le noir donne une valeur de 0 W/m^2 . Cette valeur sert d'étalonnage des valeurs obtenues par la suite. En plaçant le miroir concave face au soleil on obtient grâce au solarimètre un éclaircissement de 1104 W/m^2 .

En plaçant une feuille colorée en noir on observe que celle-ci brûle plus rapidement qu'une feuille blanche. La feuille a été noircie afin de s'enflammer. En effet, nous avons tenté de brûler une feuille blanche et cela n'a pas abouti la première fois, du fait que la couleur blanche n'absorbe pas autant les rayonnements au contraire du noir. Un autre facteur de cet échec provient aussi de l'ensoleillement reçu qui n'était pas optimal car nous n'étions pas dans l'axe du soleil. Alors que lors de la deuxième tentative une feuille blanche brûlait aussi mais en prenant plus de temps que la feuille noircie.

Nous avons relevé une température maximale de 250°C (205°C la première fois) au niveau du foyer (remarque : il s'agit certainement de la température maximale du thermomètre, car il affichait $250,0^\circ\text{C}$, la température réelle étant sûrement supérieure). Cela témoigne de la capacité du miroir concave de concentrer au point focal les rayonnements solaires et ainsi de chauffer ce point à hautes températures.

La surface brûlée est de : $1,875 \text{ cm}^2$. En effet, la tâche brûlée est d'environ 7,5 carreaux de $0,25 \text{ cm}$. Ainsi, un carreau mesure $0,25 \text{ cm}^2$. D'où le résultat de la surface brûlée : $7,5 \times 0,25 = 1,875 \text{ cm}^2$

Or, la surface du miroir concave peut être déterminée en calculant l'aire d'une calotte sphérique :

$S_{\text{miroir}} = 2 \times \pi \times R \times h$, avec R le rayon de courbure et h la hauteur

En mesurant le miroir on obtient : $h = 5,0 \text{ cm}$

Et R s'obtient par la relation vue au I : $f = R/2$. D'où $R = 2 \times f = 2 \times 41 = 82 \text{ cm}$

Ainsi, $S_{\text{miroir}} = 2 \times \pi \times 82 \times 5,0 = 2576 \text{ cm}^2$

On en déduit le facteur de concentration défini par la relation : $\alpha_{cg} = S_{\text{miroir}}/S_{\text{récepteur}}$

Donc, $\alpha_{cg} = 2576/1,875 = 1374$

Ainsi, expérimentalement nous avons déterminé le facteur de concentration. Ce facteur signifie que l'éclaircissement au niveau du foyer est 1374 fois plus grand que l'éclaircissement reçu à la surface du miroir. De ce fait, plus celui-ci est grand plus la température obtenue au foyer sera élevée. Notre valeur élevée explique la forte température relevée au foyer.



Mesure de la distance focale



Combustion de la feuille



Surface brûlée



Dispositif de maintien de la feuille, en combustion



Solarimètre (éclairage non concentré)

2. PRODUCTION ÉLECTRIQUE

2.1. Partie théorique

Dans cette partie nous allons aborder la production électrique suite à la récupération de chaleur des concentrateurs solaires.

2.1.1. Principe et cycle de Carnot

Le principe général de la production électrique grâce aux concentrateurs solaires est d'utiliser la chaleur concentrée pour faire fonctionner un cycle thermodynamique moteur.

En effet, les concentrateurs solaires après avoir concentré les rayons solaires, chauffent des fluides caloporteurs, ce qui permet d'emmagasiner de la chaleur. Cette dernière est utilisée dans un cycle thermodynamique où la chaleur vaporise le fluide thermodynamique qui entraîne une turbine, produisant ainsi de l'énergie mécanique qui est ensuite convertie en électricité. La chaleur récupérée par les concentrateurs est échangée avec le cycle thermodynamique grâce à un échangeur de chaleur.

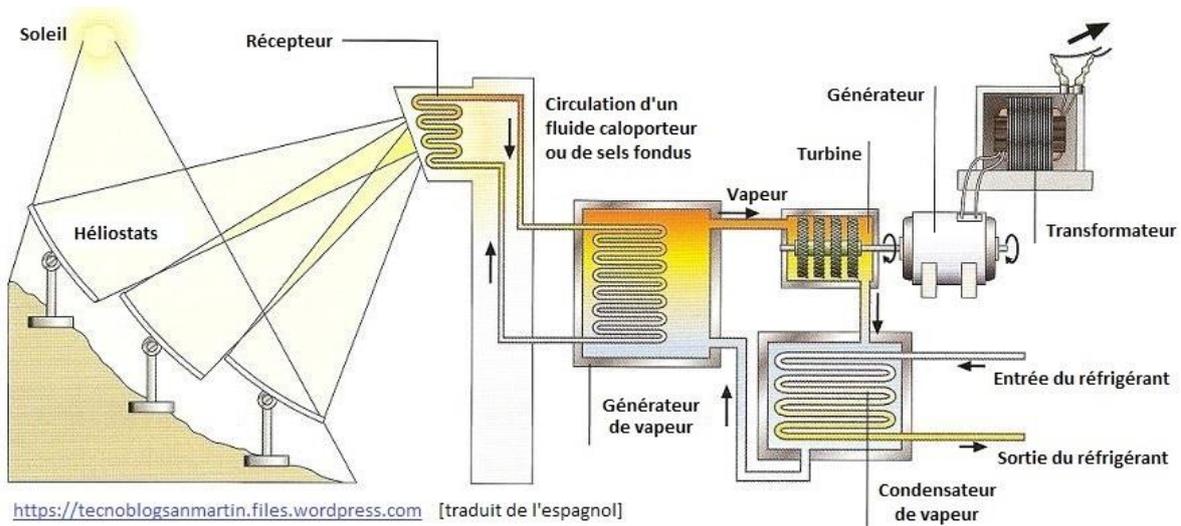


Schéma présentant la production électrique d'une centrale à tour

Pour produire de l'électricité, il faut un cycle thermodynamique moteur (c'est-à-dire qui produit de l'énergie mécanique) et ditherme. Ainsi, la chaleur de la source chaude est convertie, en partie, en énergie mécanique dans la turbine, puis est transformée en électricité. Le reste de l'énergie non convertie part à la source froide. D'où le terme de ditherme car il y a deux sources de chaleur. Un fonctionnement ditherme est nécessaire pour produire de l'énergie mécanique selon le second principe de la thermodynamique.

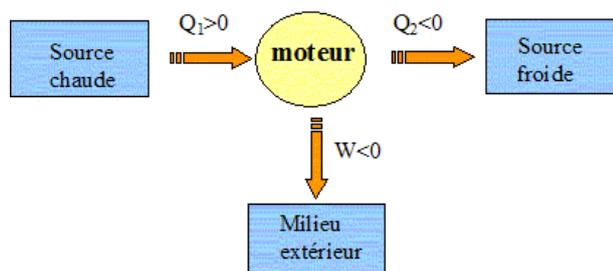


Schéma
présentant le
principe d'un
cycle moteur

Le cycle moteur possédant le meilleur rendement est le cycle idéal de Carnot. Il est composé de deux isothermes et de deux isentropiques (transformations adiabatiques réversibles). Son rendement est maximal et est égal à : $r_{carnot} = 1 - T_f/T_c$, où T_f est la température de la source froide et T_c la température de la source chaude (températures en Kelvin K).

On constate ici que le rendement ne peut pas être de 100% car la source froide ne peut avoir une température de 0 K et la source chaude une température infinie. Cependant, on réalise que plus la différence de température entre la source froide et chaude est importante plus le rendement est élevé.

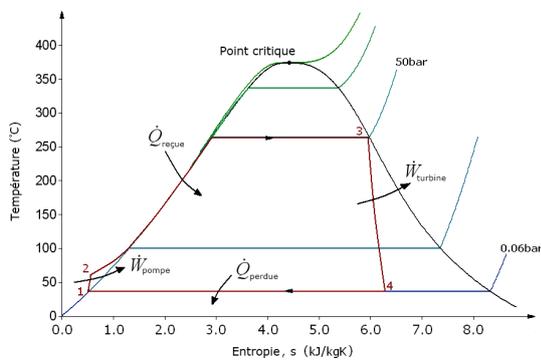
Toutefois, ce cycle est théorique car non utilisé en pratique. Cela s'explique par le fait que les transformations doivent être lentes pour qu'elles soient réversibles, et sont donc difficiles à mettre en œuvre. C'est pourquoi nous allons voir d'autres cycles utilisés en pratique pour la production électrique. A noter que le rendement des autres cycles ne peut pas dépasser celui de Carnot, on aura donc $r_{cycle} \leq r_{carnot}$.

2.1.2. Le cycle de Rankine

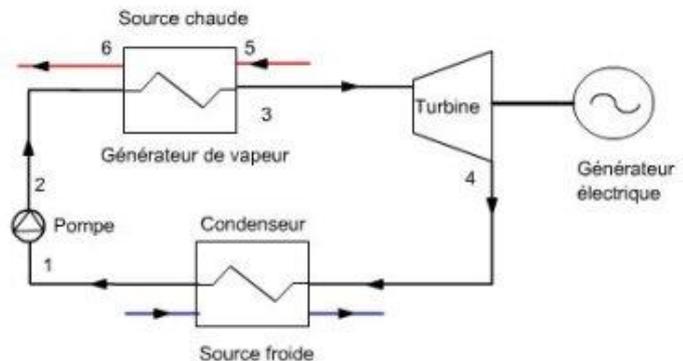
C'est le cycle le plus utilisé en pratique car son rendement se rapproche le plus de celui de Carnot.

Ce cycle est composé de quatre étapes :

- 1→2 : Compression adiabatique et réversible (isentropique)
- 2→3 : Vaporisation isobare et irréversible.
- 3→4 : Détente adiabatique et réversible (isentropique).
- 4→1 : Liquéfaction isobare et irréversible.



Étapes du cycle de Rankine dans le diagramme T/S



Installation possible pour le cycle de Rankine

On constate que le cycle de Rankine remplace les deux transformations isothermes par des transformations isobares et irréversibles.

Le changement d'état du fluide thermodynamique lors de la deuxième étape est assuré par la chaleur de la source chaude provenant de la chaleur emmagasinée par le concentrateur solaire.

Le travail est fourni lors de la troisième étape par l'intermédiaire d'une turbine.

Il existe deux variantes du cycle de Rankine portant sur la nature du fluide thermodynamique utilisé : le cycle de Rankine vapeur, qui utilise de l'eau, et le cycle de Rankine organique.

Ce dernier utilise des fluides organiques, tel que des alcanes ou éthers par exemple. Un intérêt d'utiliser des fluides organiques au lieu de l'eau est que les fluides organiques ont une température

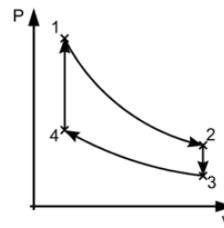
d'ébullition plus basse que l'eau. Ainsi, il faut moins amener de chaleur pour porter à ébullition ce fluide. De plus, de par la masse molaire plus élevée de ces composés par rapport à l'eau, la vitesse de rotation au niveau de la turbine est diminuée. Cela permet de travailler à moindre pression et de moins fatiguer les différents éléments de la turbine. Ce qui revient donc moins cher par rapport au cycle de Rankine vapeur.

2.1.3. Le cycle de Stirling

Un autre type de cycle utilisé est celui de Stirling. Il est principalement utilisé dans les centrales à miroir parabolique Dish-Stirling.

Le cycle comporte aussi quatre étapes :

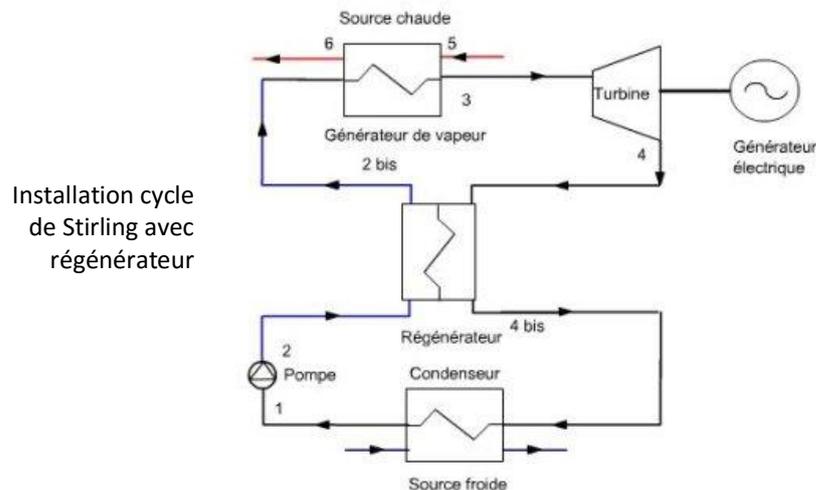
- 1→2 : Compression isothermique
- 2→3 : Chauffage isochore
- 3→4 : Détente isotherme
- 4→1 : Refroidissement isochore



Étapes du cycle de Stirling dans le diagramme P/V

La première étape de compression nécessite de consommer du travail, mais celui-ci est récupéré par le travail fourni lors de la détente à la troisième étape. Le chauffage de la deuxième étape est assuré ici aussi par la chaleur récoltée par le concentrateur. Le fluide utilisé est généralement de l'hélium ou de l'hydrogène.

Le rendement est inférieur à celui de Carnot mais en présence d'un régénérateur le rendement du cycle de Stirling s'approche sensiblement de celui de Carnot.



Installation cycle de Stirling avec régénérateur

Le régénérateur a pour principe de récupérer la chaleur de la source froide et la réutiliser pour la source chaude.

On voit donc bien sur ce schéma que la chaleur non convertie en énergie mécanique dans la turbine va à la source froide. Cependant, cette chaleur est réutilisée dans le régénérateur (qui est en fait un échangeur de chaleur) pour chauffer le fluide qui va entrer dans le générateur de vapeur. Ainsi, le fluide sera plus chaud en entrée du générateur de vapeur que s'il n'y avait pas de régénérateur.

2.1.4. Les fluides caloporteurs et thermodynamiques

Un **fluide caloporteur (ou calorporteur)** est un fluide chargé d'assurer le transport de la chaleur entre deux ou plusieurs sources thermiques.

Dans le cas des concentrateurs solaires, les rayons convergent vers ce fluide qui est chauffé à haute température.

Une fois que ce fluide est chauffé, son énergie thermique pourra être transformée en énergie électrique par le biais de turbines à vapeur ou à gaz.

Ensuite, on utilise un **fluide thermodynamique** (ou fluide de travail) qui permet d'actionner et d'entraîner les machines (moteurs, turbines). Très souvent, le fluide caloporteur est utilisé en tant que fluide thermodynamique.

Cependant, un fluide caloporteur doit respecter un certain nombre de contraintes techniques, de sécurité, environnementales et aussi économiques. Ainsi, un bon fluide caloporteur doit prendre en compte les conditions suivantes :

- être chimiquement stable lorsqu'il atteint une forte température ;
- posséder des propriétés antigel en corrélation avec les conditions météorologiques locales ;
- posséder des propriétés anticorrosives selon la nature des matériaux présents dans le circuit capteur ;
- posséder une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevées afin de transporter efficacement la chaleur ;
- être non-toxique et avoir un faible impact sur l'environnement (couche d'ozone et contribution à l'effet de serre) ;
- avoir une basse viscosité afin de faciliter la tâche de la pompe de circulation ;
- être facilement disponible et bon marché.

Il existe plusieurs types de fluides caloporteurs selon leurs applications :

- **Les gaz tels que l'azote, l'air, le dioxyde de carbone, l'hélium et la vapeur d'eau** surchauffée sont les principaux gaz caloporteurs.

Ils sont utilisés pour entraîner les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques.

L'air peut aussi être utilisé comme fluide caloporteur (ou thermodynamique) dans les turbines à gaz.

Ce sont, à l'exception de l'air, des composés simples. Ils sont ininflammables, non dangereux pour la santé en concentration modérée, à faible impact environnemental et stables sur un grand domaine de température et de pression.

- **L'eau liquide** constitue un excellent caloporteur et sert de fluide de référence pour les autres fluides. Elle possède une forte capacité thermique et un excellent coefficient d'échange (le coefficient d'échange correspond aux échanges de chaleur de l'intérieur (du fluide ici) avec l'extérieur).

Ainsi, elle peut être directement utilisée comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. Cependant, son usage, à l'état pur, est limité à des températures supérieures à 0,01 °C (point triple) et inférieures à 300°C, compte tenu des pressions importantes de saturation. De plus, l'installation d'une structure adaptée est nécessaire (à cause des températures élevées engendrées) et très coûteuse. L'eau doit également être filtrée, traitée et purifiée pour une utilisation industrielle, car elle peut dissoudre des espèces minérales sous forme d'ions et de gaz (O₂, CO₂).

- **Les fluides caloporteurs organiques** existent et peuvent être subdivisés en trois catégories :
 - les **huiles minérales** ou les hydrocarbures d'origine pétrolière ;
 - les **huiles synthétiques** comprenant principalement les aromatiques et les silicones ;
 - les **fluides halogénés** de type PFC (perfluorocarbure), PFPE (perfluoropolyéther) ou, plus récemment, HFE (hydrofluoroéther).

Ces fluides sont monophasiques et présentent un bon coefficient d'échange. Leur gamme de température est limitée à 400 °C. L'huile est le fluide le plus employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques. De plus, les fluides organiques, possédant une température d'évaporation basse, sont utilisés comme fluide thermodynamique dans le cycle de Rankine.

- **Les sels fondus** les plus courants sont formés de nitrite de sodium (NaNO_2), de nitrate de sodium (NaNO_3) et de nitrate de potassium (KNO_3).

Leurs principaux avantages sont de pouvoir fonctionner à la pression atmosphérique pour des températures comprises entre 150 et 550 °C. Ces sels purs ne sont liquides qu'au-dessus de 300 °C. Ils offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée. Ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur association avec un concentrateur à tour et un cycle de Rankine constitue une combinaison déjà éprouvée.

- **Certains métaux liquides** ayant fait l'objet d'essais approfondis sont actuellement utilisés comme fluides caloporteurs. Comme le mercure (Hg), le sodium (Na), les alliages sodium-potassium (Na-K), le lithium (Li), le plomb (Pb) et les alliages plomb-bismuth (Pb-Bi).

Leur domaine d'application est compris entre 200 et 700 °C et leur stabilité thermique est parfaite puisque ce sont des corps simples.

Leur faible capacité thermique massique (de l'ordre de 1 000 J/(kg · K) génère un pouvoir caloporteur moyen inférieur de 20 à 50 % de celui de l'eau.

Cependant, leur bonne conductivité thermique [de l'ordre de 10 à 100 W/(m · K)] donne un très bon pouvoir caloporteur.

2.1.5. Comparaison et avantage de la production électrique par des concentrateurs solaires

La plupart des nouvelles centrales solaires thermodynamiques ont aujourd'hui une puissance située entre 50 et 200 MW.

Cela est 10 à 40 fois plus important qu'une grande éolienne dont la puissance est de 5 MW ⁵.

Cependant, cette puissance reste bien inférieure à celle d'un réacteur nucléaire, comme par exemple celui de Flamanville avec une puissance de 1300 MW.

Toutefois, un des grands avantages du solaire thermique pour la production électrique vis-à-vis d'autres énergies renouvelables (par exemple l'éolien ou les panneaux photovoltaïques) est le fait de pouvoir pratiquement produire de l'électricité en continue. En effet, au cours du cycle thermodynamique le fluide chauffé est divisé en deux: une partie fait fonctionner la turbine et l'autre partie est stockée (le plus souvent en utilisant des sels fondus). Ainsi, lorsque les concentrateurs ne chauffent plus le fluide car il n'y a plus assez de rayons lumineux (nuit ou temps non ensoleillé), la partie de fluide stockée permet de faire fonctionner encore la turbine et de produire de l'électricité.

⁵ Source : <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration>

2.2. Partie expérimentale

2.2.1. Expérience 2 (02/05/2017)

Le but de cette expérience est de faire bouillir de l'eau pour montrer que le concentrateur solaire peut vaporiser un liquide pour faire tourner une turbine.

Protocole :

- 1- Positionner le miroir concave et le projecteur de 1000W sur l'axe optique à une distance d'environ un mètre.
- 2- Placer au point focal déterminé précédemment un bécher contenant 50mL d'eau et prélever immédiatement sa température initiale.
- 3- Positionner un thermomètre à l'intérieur et effectuer un relevé de température toutes les minutes.
- 4- Établir le tableau des données et interpréter.

Si la lampe n'est pas assez puissante, recommencer avec la lumière directe du Soleil.

Résultats :

Nous avons relevé les températures à différents instants (toutes les minutes).

Nous avons atteint 71.7°C au maximum (voir image ci-dessous). Cette température en dessous de 100°C n'a pas permis de faire bouillir de l'eau. Néanmoins, nous avons observé le début de l'évaporation (bulles d'air et augmentation de la température comme nous pouvons le constater sur l'image ci-dessous avec le bécher). Nous avons obtenu les valeurs ci-dessous :

t(min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T(°C)	21.8	26.5	35.9	37.2	40.8	53.9	56.3	68	60.3	70.4	60

Nous observons une variation de température dans le bécher, celle-ci diminue à $t = 8 \text{ min}$ augmente par la suite et diminue encore à la fin. Ceci est dû à la variation de l'ensoleillement et donc l'apparition de nuages entre ces deux périodes. Nous avons également fait un arrêt du chronomètre entre les deux pour que l'ensoleillement se rétablisse.



Dispositif pour faire bouillir de l'eau



Température maximale observée



Apparition de buée sur le bécher

2.2.2. Expérience 3 (30/05/2017)

Le but de cette expérience est de montrer qu'à partir d'un fluide vaporisé on peut produire de l'électricité, ou du moins, générer une tension.

Protocole :

- 1- Faire chauffer de l'eau dans une cocotte-minute.
- 2- Réaliser un montage reliant l'hélice, le moteur et la LED.
- 3- Lorsque la vapeur commence à s'échapper de la cocotte, retirer le bouchon pour libérer la vapeur et positionner le montage au-dessus de manière à faire tourner l'hélice et donc faire briller la LED.
- 4- Si la LED ne brille pas, mesurer aussi la tension à ces bornes grâce à un voltmètre.

Résultats :

On constate une mise en rotation de l'hélice grâce au jet de vapeur de la cocotte-minute. Bien que la LED ne se soit pas allumée, on mesure au voltmètre une tension non nulle, avec pour valeur maximum mesurée 150,88 mV.

La LED ne s'est pas allumée car la tension obtenue était insuffisante pour permettre son allumage. En effet, la tension de seuil (valeur minimale permettant l'allumage d'une LED) est de l'ordre de 1.6-1.8V pour une LED rouge. Il aurait fallu un moteur plus puissant afin de produire plus d'électricité et de tension.

Dans cette expérience, nous n'avons pas utilisé de concentrateurs solaires pour chauffer l'eau car, expérimentalement, il était difficile de produire un jet de vapeur avec un petit miroir sphérique. C'est pourquoi, nous avons privilégié l'utilisation d'une cocotte-minute. Cependant, dans les installations réelles le fluide est chauffé grâce aux concentrateurs solaires afin de faire tourner une turbine, ici modélisé par une hélice.

On voit donc au travers de cette expérience, à petite échelle, comment est produit l'électricité grâce à de la vapeur d'un fluide.



Dispositif pour allumer la LED



Tension maximale observée

3. ASPECTS HISTORIQUE, ECONOMIQUE, SOCIAL ET ENVIRONNEMENTAL

3.1. Aspect historique

Il faut remonter aux Jeux Olympiques de 776 avant Jésus-Christ pour trouver la première utilisation de l'énergie solaire. En effet, les grecs ont utilisé, lors de la cérémonie d'ouverture, les rayons du soleil pour obtenir la flamme olympique. Elle était obtenue grâce aux rayons concentrés au centre du *skaphia*, un récipient qui est l'ancêtre du miroir parabolique. Ce miroir est d'ailleurs réutilisé par Archimède 5 siècles plus tard pendant le siège de Syracuse (Sicile). La légende raconte que des miroirs en bronze polis réfléchissaient les rayons solaires dans les voiles des navires romains pour les enflammer.



Archimède et son miroir pour brûler les navires ennemis

Un miroir composé de 168 glaces de petites tailles est construit par Georges-Louis Leclerc en 1747. Ce miroir permet de faire fondre différents métaux comme l'étain, le plomb et l'argent.

En 1912, Charles Vernon Boys inventa le premier capteur cylindro-parabolique. Cette invention correspond à la création de la première centrale électrique solaire, par Frank Shuman, située à Meadi, en Egypte et utilisé pour le pompage de l'eau d'irrigation.

En 1944, les allemands abandonnent à Mont-Louis un projecteur DCA, utilisé pour repérer les avions. Utilisé la nuit, c'est un miroir parabolique que l'on éclaire et qui permet de donner un faisceau de lumière parallèle. Félix Trombe le transforme en four solaire en l'utilisant "à l'envers": Orienté vers le soleil de jour, les rayons solaires sont concentrés vers le foyer grâce au miroir parabolique.

La première centrale solaire à concentration est conçue par Giovanni Francia près de Gênes en Italie, dès 1968. Cette centrale utilise la technologie CLFR : des réflecteurs à miroirs de Fresnel linéaires. À partir de 1983, le CNRS et EDF ouvrent la centrale solaire à tour de Thémis à proximité d'Odeillo, en France.

En 1985, la compagnie Luz International développe le concept cylindro-parabolique pour construire 9 centrales, appelées Solar Energy Generating System (SEGS). La puissance totale de ces centrales est de 354 MW. En 2010, SEGS était toujours la plus grande centrale d'énergie solaire au monde.

La centrale PS10, située en Espagne, est une des centrales les plus connues dans le monde. Mise en fonctionnement en 2008, c'est la première centrale solaire à concentration destinée à l'exploitation commerciale. Elle correspond d'ailleurs à notre étude de cas.

La plupart des centrales solaires à concentration ont ouvert dans les années 2010. La dernière centrale ouverte est située en Afrique du Sud. Elle a été inaugurée en mars 2016 et peut alimenter en moyenne 200 000 foyers.

Il est important de souligner que les premières centrales à capteur cylindro-parabolique sont apparues dans les années 80, alors que les premières expérimentations concernant les centrales à tour ont débuté en 1976. Ces recherches prouvent que l'énergie solaire est prise au sérieux depuis quelques dizaines d'années. De plus, durant les années 2000, des panneaux photovoltaïques à concentration ont été inventés. Ils ne sont encore aujourd'hui que peu répandus mais semblent être l'avenir des concentrateurs. Concernant les chiffres actuels, environ 70 centrales solaires à concentration dans le monde chauffent et vaporisent un fluide qui permet la rotation d'une turbine pour pouvoir produire de l'électricité. Plus les années passent, plus le monde pense à développer cette technique pour augmenter la production propre d'électricité.

3.2. Aspect économique

Dans son rapport datant de 2014, l'AIE prévoit que le solaire thermodynamique à concentration (toutes filières confondues) représentera 11 % de la production d'électricité en 2050, soit 4 350 TWh. Pourtant, on est toujours loin de ces chiffres et le marché de l'électricité solaire est très peu développé, alors que le soleil est gratuit contrairement à d'autres sources d'énergies.

Actuellement, l'Espagne et les États-Unis concentrent la quasi-totalité des centrales thermodynamiques en activité. Ils sont pour l'instant les seuls à commercialiser de l'électricité provenant du solaire à concentration.

En particulier, la société espagnole Abengoa Solar est le principal développeur de centrales solaires thermodynamiques dans le monde. Elle est toutefois confrontée à d'importantes difficultés de financements et a présenté début février 2016 à ses banques un plan de redressement afin de lui éviter une faillite. Cela montre bien que cette énergie n'est pas encore rentable économiquement parlant.

Afin de comparer les coûts de production de l'électricité entre les différentes techniques de production, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- Le coût d'investissement
- Le coût d'opération et de maintenance
- Les coûts liés à l'utilisation de l'énergie primaire
- Les coûts liés à l'ensoleillement

Une étude de l'IRENA (Agence internationale de l'énergie renouvelable) publiée en 2013 évalue les coûts de production de l'électricité renouvelable pour les installations solaires thermodynamiques en 2012 :

- Installation cylindro-parabolique et Fresnel, sans système de stockage : 0,19 à 0,38 \$/kWh ;
- Avec un système de stockage de six heures : 0,17 à 0,37 \$/kWh ;
- Centrales à tour : 0,20 à 0,29 \$/kWh avec système de stockage de six heures à sept heures 30 ;
- Avec stockage de 12-15 h : 0,17 à 0,24 \$/kWh.

Le coût est fortement corrélé à l'ensoleillement : soit une base à 2 100 kWh/m²/an (ensoleillement DNI typique pour l'Espagne), le coût de production de l'électricité diminue de 4,5 % pour chaque tranche de 100 kWh/m²/an en plus.

En prenant en compte tous les facteurs, il a été montré que parmi les différentes technologies de concentration solaire, les capteurs paraboliques produisent de l'électricité à un coût supérieur par rapport aux deux autres techniques.

Les coûts présentés datant de 2012, il est important de noter qu'ils sont en constante diminution grâce aux progrès technologiques.

De plus, il a été constaté que l'électricité provenant des centrales solaires est bien moins coûteuse que celle produite par panneaux photovoltaïques, notamment car les coûts peuvent être réduits drastiquement par la production à grande échelle.

Malheureusement en France, l'électricité solaire est une des sources d'énergies les plus chères, notamment à cause des recherches peu avancées. Le coût de production d'un Méga Watt heure d'énergie solaire thermique est d'environ 300€. En comparaison, le coût de production de l'énergie nucléaire (la principale source d'énergie en France) est de 49.5€/MWh. En conclusion, le solaire thermique est 6 fois plus cher que le nucléaire. De même, il est 15 à 20 fois plus cher que l'hydraulique.

Au niveau économique mondial, la technologie des centrales solaires pour la production d'électricité est prête pour le marché, il est même prévu que l'électricité produite grâce à l'énergie solaire thermodynamique soit compétitive économiquement face aux énergies fossiles d'ici 10 à 15 ans (sachant que la durée de vie d'une installation est estimée entre 25 et 40 ans). De plus, de nouvelles techniques annexes sont cherchées pour réutiliser l'énergie et ainsi augmenter les rendements. Par exemple la cogénération, c'est-à-dire l'utilisation de la chaleur résiduelle après génération électrique est mise en place pour produire de l'eau dessalée ou du froid, et augmente sensiblement la compétitivité des installations solaires thermodynamiques.

Enfin, l'émergence en 2014 d'une nouvelle monnaie électronique, le SolarCoin, similaire au BitCoin, permet de favoriser la production d'électricité d'origine solaire, en reversant des SolarCoin aux propriétaires d'installations solaires. Ainsi, 1 MWh produit donne droit à 1 \$, qui a aujourd'hui peu de valeur, mais qui devrait fortement en prendre à l'avenir : son créateur Nick Gogerty espère un cours de 20 à 30 dollars dans les cinq prochaines années, ce qui permettrait d'accélérer l'implantation de centrales solaires.

3.3. Aspect social

La technologie des centrales solaires est relativement jeune, peu développée et parfois même encore expérimentale. Elle présente donc un énorme potentiel de développement mais repose essentiellement sur les subventions des gouvernements, organisations internationales et partage des connaissances en attendant une prise de conscience générale des particuliers, investisseurs et entrepreneurs.

L'AIE (Agence Internationale de l'Energie) a établi dès 1977 un programme de coopération (Solar PACES) portant sur la Recherche et Développement dans le domaine de la concentration de l'énergie solaire. Quinze pays dont la France y participent. Des initiatives internationales ont également été engagées dans ce domaine comme le Plan Solaire Méditerranéen, un partenariat entre les pays riverains de la Méditerranée et l'Union européenne ayant pour but de lancer des projets régionaux.

Depuis 2004, certains gouvernements ont pris des mesures visant à encourager la construction de centrales à énergie solaire thermodynamique. Le gouvernement espagnol a par exemple fixé des tarifs de rachat d'électricité. Par conséquent, plusieurs projets de centrales solaires thermodynamiques ont vu le jour.

D'ailleurs, dans le cadre du projet de l'Union de l'énergie, la Commission européenne veut réviser le marché européen de l'électricité en attribuant les aides publiques nationales aux énergies renouvelables. Ces subventions devraient favoriser la recherche, l'ingénierie, pour ensuite attirer des investisseurs et créer de l'emploi.

Les prochaines décennies verront donc plus que probablement la création d'un nombre important de concentrateurs paraboliques, cylindro-paraboliques, et de tours solaires. Les coûts seront ainsi

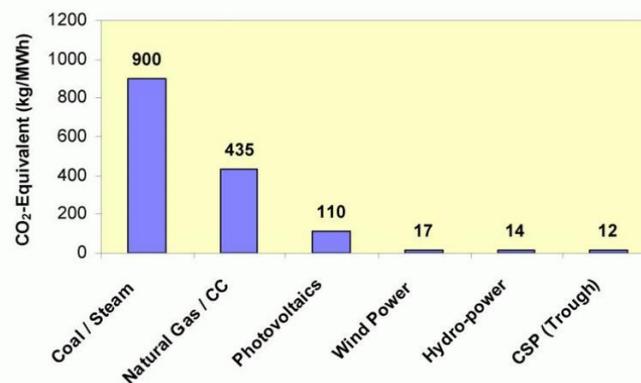
fortement diminués et il est possible que les subventions gouvernementales à de tels systèmes deviennent obsolètes.

Du côté de l'emploi, l'essor de l'énergie solaire engendre la création de nouveaux postes tels que des chercheurs, ingénieurs, mais aussi techniciens et métiers pratiques. Pourtant, si cela s'accompagne du déclin des autres formes d'énergie, des suppressions d'emplois dans les secteurs du gaz et du charbon sont à prévoir.

Considérons le cas européen. Le solaire pourrait jouer un rôle crucial : réduire la dépendance énergétique de l'UE et atteindre les objectifs énergie et climat 2020 et 2030 fixé par l'AIE. Pour l'instant, le principal frein au développement européen de l'énergie solaire est son coût, annoncent les responsables politiques de l'UE. Mais, si celui-ci baisse de façon considérable grâce aux mesures précédemment citées, l'attitude européenne s'en trouvera nécessairement modifiée.

3.4. Aspect environnemental

Bien évidemment, les concentrateurs solaires utilisent une énergie propre, le soleil, qui est une source renouvelable, gratuite et « infinie ». Cette caractéristique est aujourd'hui très importante pour l'Homme, celui-ci devant réduire ses déchets. De plus, ce sont des systèmes silencieux, donc la population résidant aux alentours des centrales n'est pas dérangée, contrairement aux éoliennes par exemple. Par ailleurs, l'énergie solaire reçue annuellement sur Terre correspond à environ 7000 fois l'énergie consommée par l'Homme. Il faut donc développer l'utilisation de cette énergie, qui semble correspondre au respect de l'environnement, et surtout être suffisante pour répondre aux besoins de l'humanité. En outre, les concentrateurs solaires pourraient permettre une valorisation des zones désertiques. En effet, d'après Greenpeace, l'énergie contenue dans 1.5 million de barils de pétrole équivaut à l'énergie solaire reçue annuellement sur chaque kilomètre carré de désert. D'ailleurs, selon les experts du projet Desertec, « Couvrir 0,3% de la surface des déserts suffirait à produire l'électricité nécessaire à l'ensemble de l'humanité ». Cependant, l'installation de ces centrales requiert des surfaces énormes, avec un approvisionnement en eau à proximité (nettoyage miroirs, cycle vapeur...).



Émissions de CO₂, basées sur l'étude du cycle de vie pour différentes technologies de production d'électricité

L'avantage des centrales solaires thermodynamiques est qu'il n'y a pas de production directe de déchets ou de gaz à effet de serre. Cependant, les seuls déchets créés apparaissent lorsque l'énergie est fabriquée ou transportée. Comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessus, les émissions de CO₂ sont d'environ 12 kg/MWh pour les concentrateurs solaires alors que les panneaux photovoltaïques rejettent 110 kg/MWh. Cette énergie, si elle se développe à grande échelle, permettrait donc de compenser les énergies polluantes et ne serait que bénéfique pour l'environnement.

4. ÉTUDE DE CAS : PLANTA SOLAR 10, SANLÚCAR LA MAYOR, ESPAGNE

4.1. Présentation

La centrale PS10 de Sanlúcar la Mayor, près de Séville, est la première centrale solaire commerciale du monde. Mise en service en 2008 par Solucar, elle est composée de 624 héliostats répartis sur 69 hectares. Elle a coûté 35 millions d'euros pour une puissance de 11 MW, grâce à sa tour de 115 mètres de haut. Le projet espagnol était d'atteindre en 2013 une puissance totale de 300 MW à l'aide de plusieurs centrales installées dans la même zone. La centrale PS20 est d'ailleurs située à côté de la centrale PS10.



PS10 et PS20, centrales solaires jumelles de Sanlúcar la Mayor



Tour réceptrice de PS10

4.2. Description technique

PS10 est un exemple de centrale solaire dite « à concentration » : elle utilise le rayonnement solaire comme source d'énergie, pour produire de l'électricité au moyen d'héliostats concentrant les rayons sur un récepteur traversé par un fluide caloporteur, lui-même lié à un cycle thermodynamique. Son efficacité énergétique est approximativement de 17%.

Les miroirs ont chacun une surface de 120 m², soit une surface totale de miroirs d'environ 75 000 m². Le champ de panneaux pivote à la manière des tournesols, ce qui permet une exposition au soleil maximale. C'est d'ailleurs la nature qui a inspiré Marco Bernardi et ses collègues, à travers la structure en trois dimensions des arbres et autres plantes qui dépendent du soleil pour vivre.

La tour solaire PS10 stocke, à une pression de 50 bars et une température de 285°C, la chaleur dans des réservoirs d'eau chauffée. Cette chaleur est stockée pendant une heure. Cependant, l'eau s'évapore quand la pression baisse. Il y aurait, de plus, une volonté de remplacer le fluide caloporteur utilisé, l'eau, par des sels fondus, offrant une capacité de stockage énergétique bien supérieure, allant sur plusieurs heures.

4.3. Situation économique et sociale de la centrale

PS10 fait partie d'un plus grand complexe de centrales thermodynamiques dans la région autour de Sanlúcar la Mayor, en Espagne. Cette plate-forme comprend la centrale à tour PS20 (20 MW) et la centrale solaire de Solnova utilisant des miroirs cylindro-paraboliques. Solnova est composée de cinq unités dont trois en fonctionnement et deux en développement avec chacun une puissance nominale de 50 MW. La puissance actuelle de ce complexe est de 180 MW avec pour objectif d'atteindre 300 MW. Cependant, cet objectif était fixé initialement pour 2013. Or, la puissance nominale est aujourd'hui loin des 300 MW.

PS10 a été construite par la société Solacar (maintenant nommé Abengoa Solar), filiale d'Abengoa et appartient depuis 2014 à Atlantica Yield. La construction s'est étendue du 1er juillet 2001 au 31 décembre 2005.

Cette plate-forme solaire dont fait partie PS10 permet de fournir de l'électricité à 94 000 foyers par an. Cette production d'électricité permet d'éviter le rejet de 114 000 tonnes de CO₂ par an. Et PS10 seule permet de produire environ 23 GWh/an, soit l'équivalent de 5500 foyers, et permet d'éviter le rejet de 16 000 tonnes de CO₂ par an.

Le complexe a permis l'emploi de 1000 personnes lors de la construction et emploie actuellement 150 personnes pour la gestion des centrales.

Depuis le début de la construction de PS10, première centrale du complexe, la région autour du site a reçu des retombées économiques positives par achat de biens et de services. De plus, du tourisme a été généré, profitant encore à la région.

Concernant le financement pour la construction de la centrale, il est à noter que 5 des 35 millions d'euros nécessaires ont été apportés par le cinquième programme-cadre de l'Union européenne pour la recherche et le développement technologique. Le gouvernement régional a quant à lui apporté 1.2 millions d'euros.

Le coût de production de PS10 est de 14 à 20 centimes d'euros le KWh. Actuellement, la centrale produit 23,4 GWh par an, racheté à 27,1 centimes d'euros le KWh, soit un revenu d'environ 6,3 millions d'euros par an. Le tarif de rachat espagnol, très favorable, permet à la centrale d'être rentable, d'autant plus qu'avec le développement d'autres centrales thermodynamiques son coût d'exploitation tend à diminuer.

4.4. La politique de développement de l'énergie solaire en Espagne

L'Espagne est entrée sur le marché de l'énergie solaire à concentration (CSP) en 2007, avec la construction de cette centrale à tour solaire PS10. Puis, en 2011, l'Espagne est devenue le principal acteur mondial du marché de l'énergie solaire à concentration avec 65% de la capacité totale installée (soit 1.002,2 MW).

En effet, depuis en 2005, l'Etat espagnol a instauré un plan dans le secteur des énergies renouvelables qui prévoyait une attention particulière à l'industrie de l'énergie solaire. Ainsi, le fort ensoleillement et d'importantes aides gouvernementales ont permis l'essor du CSP en Espagne.

Pour la première fois en Europe, PS10 a démontré que l'exploitation commerciale d'une centrale solaire à concentration pour produire de l'électricité solaire était possible.

CONCLUSION

En conclusion, nous pouvons tous dire que ce projet nous a appris énormément sur les concentrateurs et la production électrique engendrée. Cette énergie renouvelable est encore peu connue et répandue, pourtant elle possède un formidable potentiel.

Tout d'abord, la diversité des installations permet d'adapter la production aux besoins de chacun et de répondre aux différentes contraintes techniques liées au lieu d'installation. Ensuite, la production électrique peut être mise en place sous différentes formes, qui permettent là aussi de varier les types de production mais surtout d'augmenter le plus possible le rendement. Pourtant, nous avons constaté que cette énergie était très peu développée, notamment à cause des politiques. En effet, le nombre d'emploi engendrés et les retombées économiques ne sont pas encore assez importants. Si on prend le cas de la France, les productions nucléaires de masse sont bien plus performantes et permettent de produire des quantités d'énergie trop importantes pour être de nos jours remplacées par les concentrateurs solaires. Pourtant, l'Espagne a déjà fait le choix de cette production d'énergie, comme nous l'avons vu dans notre étude de cas avec la centrale PS10. Sa centrale possède des composants recyclables, le temps de retour énergétique est estimé à environ 6 mois et concernant la création d'emplois, 1 MWe installé équivaut à 2 emplois directs créés.

Tout le travail expérimental que nous avons fait à côté des recherches théoriques nous a permis de mieux appréhender les caractéristiques des installations. Nous avons ainsi compris la simplicité de concentration des rayons lumineux mais les grandes difficultés liées à la météo, aux contraintes géographiques du site... Nos expériences n'ont pas toujours été des réussites, ce qui a nous a permis de pousser nos réflexions et de les adapter à des modèles "grandeur nature".

Sachant qu'1% de la surface des zones arides et semi-arides serait suffisante pour produire l'électricité consommée dans le monde annuellement, il est grand temps de développer plus largement ces installations qui peuvent actuellement produire de l'énergie propre et de masse. De même tous les efforts faits pour améliorer les rendements pousseront forcément à de plus nombreuses installations. Nous pouvons ainsi citer quelques exemples sur lesquels travaillent actuellement les chercheurs :

- matériaux réfléchissants qui engendreront une réflectivité accrue (>94%)
- des revêtements protecteurs qui permettront une durée de vie accrue (>20 ans)
- des mécanismes et motorisations qui augmenteront la robustesse et la fiabilité
- des concepts de nouveaux dispositifs optiques qui amélioreront l'efficacité optique
- des coûts visés inférieur à 150 €/m².

Sur le plan personnel, nous avons également beaucoup appris grâce à ce projet. En effet, le travail de groupe a été très facile à mettre en place et très agréable au quotidien car il y a tout de suite eu une bonne entente au sein du groupe. Les tâches ont toujours été bien réparties et chacun d'entre nous a pu commenter et relire le travail des autres membres du groupe pour un résultat plus précis et complet.

Pour terminer, nous tenions à remercier notre professeur responsable de projet M. Abdul Aziz pour l'aide apportée tout au long du projet et pour le prêt de matériel nécessaire à nos expériences.

BIBLIOGRAPHIE – SITOGRAPHIE

Nom [Lien](#) [consulté le]

Wikipedia :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_thermodynamique [07/02/2017]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_centrales_solaires_thermodynamiques [07/02/2017]

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_thermique [07/02/2017]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling [14/03/2017]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Miroir_ardent [28/03/2017]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Panneau_photovolta%C3%AFque_%C3%A0_concentration [28/03/2017]

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrh%C3%A9liom%C3%A8tre> [04/04/2017]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_PS10 [30/05/2017]

https://en.wikipedia.org/wiki/PS10_solar_power_plant [30/05/2017]

https://en.wikipedia.org/wiki/Solucar_Complex [30/05/2017]

LABOTHAP Université de Liège :

http://www.labothap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales_solaires_SQ070925.pdf [07/02/2017]

Connaissances des énergies :

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration> [07/02/2017]

Syndicat des énergies renouvelables :

http://www.enr.fr/userfiles/files/Kit%20de%20communication/2010171642_Fichessolairethermodynamiqueintegralemai2010.pdf - Consulté le 14/02/2017 [14/02/2017]

<http://www.enr.fr/energie-solaire-thermodynamique> [14/02/2017]

Ecosources.info :

http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_miroir_Fresnel_solaire_thermodynamique [14/02/2017]

http://www.ecosources.info/dossiers/Tour_solaire_thermodynamique_centrale_a_concentration
[30/05/2017]

CNRS :

http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosolaire/contenu/alternative/alter2_textes.html [21/03/2017]

Société Française de Thermique :

http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres_2014/Communications/8551.pdf [28/02/2017]

HAL Archives ouvertes :

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00166316/file/C15.pdf> [07/03/2017]

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01174102/document> [07/03/2017]

Centre de Développement des Energies Renouvelables :

http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_011_14.pdf [07/03/2017]

Solarpedia :

http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=L%27histoire_des_%C3%A9nergies_solaires [07/03/2017]

http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_solaire_thermique [07/03/2017]

Wikifab :

[http://beta.wikifab.org/index.php/SolarOSE : concentrateur solaire thermique lin%C3%A9aire de fr esnel](http://beta.wikifab.org/index.php/SolarOSE%20%3A%20concentrateur_solaire_thermique_lin%C3%A9aire_de_fr_esnel) [07/03/2017]

Institut Coriolis pour l'Environnement :

http://www.coriolis.polytechnique.fr/Confs/Ferriere_conf.pdf [14/03/2017]

Moteur Stirling :

<http://www.moteurstirling.com/comment.php> [14/03/2017]

Astrosurf :

http://www.astrosurf.com/gap47/scolaires/Soleil_Nouveau/inventeurs-soleil.htm [14/03/2017]

Renewable Energies Transfer System :

http://www.rets-project.eu/UserFiles/File/pdf/respedia/09%20Concentrated%20solar%20power/09-Solar-energy---Part-III---Concentrated-Solar-Power_FR.pdf [14/03/2017]

Solarcoin :

<https://solarcoin.org/fr/wallet-fr/> [02/05/2017]

WeDemain.fr :

https://www.wedemain.fr/Solarcoin-la-monnaie-virtuelle-generée-par-les-panneaux-solaires_a448.html [21/03/2017]

Physagreg :

<http://www.physagreg.fr/optique-12-generalites-systemes-miroirs.php> [21/03/2017]

Université en ligne :

http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch03/co/apprendre_ch03_07.html [21/03/2017]

Powerfromthesun.net

<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html> [03/06/2017]

Massachusetts Institute of Technology :

http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10_ArchimedesResult.html [28/03/2017]

Energies-renouvelables.org :

http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/energie_renouvelable_france/Observ-ER-Barometre-Electrique-2016-Chap-10-Solaire-Thermodynamique.pdf [28/03/2017]

Techniques de l'ingénieur :

<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/fluides-controle-et-isolation-thermiques-42595210/fluides-caloporteurs-be9571/> [28/03/2017]

Quelleenergie.fr :

<https://www.quelleenergie.fr/magazine/energie-solaire/energie-solaire-bouleversement-emplois-secteur-energetique-34677/> [28/03/2017]

Energine :

<http://www.energine.com/1/10126+cnim-a-inaugure-sa-centrale-a-concentration-solaire+.html> [28/03/2017]

<http://www.energine.com/1/14291+espagne---leader-sur-le-marche-mondial-de-lenergiesolaire-thermique+.html> [30/05/2017]

Electricité et énergie :

<http://www.electricite-et-energie.com/la-centrale-solaire-photovoltaique-a-concentration-a-concentration/> [04/04/2017]

Agence ecofin :

<http://www.agenceecofin.com/solaire/1503-36618-afrique-du-sud-la-premiere-centrale-csp-a-ete-officiellement-inauguree> [04/04/2017]

Youtube (expérience 3) :

https://www.youtube.com/watch?v=Oo6DUPF_bOA [04/04/2017]

CSP World :

<http://cspworld.org/> [04/04/2017]

EDF Energies Nouvelles Réparties :

<https://www.edfenr.com/lexique/rayonnement-global/> [04/04/2017]

Photovoltaïque.info :

<http://www.photovoltaïque.info/Les-composantes-de-la-lumiere,239.html> [04/04/2017]

LTE Les Traqueurs d'Energie :

<http://www.lte-fr.com/?page=tracker> [04/04/2017]

Photoduciel :

<http://www.photoduciel.com/index.php/technique/14-revetement/7-reflexion-sur-un-metal-revetements-metalliques> [04/04/2017]

Futura Planète:

<http://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durablepanneauxsolaires-3d-deux-fois-plus-energie-produite-35382/> [30/05/2017]

Abengoa Solar:

http://www.abengoasolar.com/web/en/plantas_solares/plantas_propias/espana/index.html
[30/05/2017]

Actu-environnement :

https://www.actu-environnement.com/ae/news/espagne_solaire_concentration_ps10_seville_2434.php4
[30/05/2017]

Les Échos:

https://www.lesechos.fr/25/10/2006/LesEchos/19780-168-ECH_des-tours-solaires-en-espagne.htm
[30/05/2017]

National Renewable Energy Laboratory :

https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=38 [30/05/2017]

CREDITS D'ILLUSTRATION

Page de couverture (et poster) :

Businesswire <http://www.businesswire.com/news/home/20110526006938/fr/>

Pages 7-8 :

Connaissance des énergies <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration>

Page 9 :

Wikipedia https://fr.wikiversity.org/wiki/Miroirs_en_optique_g%C3%A9om%C3%A9trique/Miroirs_sph%C3%A9riques

Physagreg <http://www.physagreg.fr/optique-12-generalites-systemes-miroirs.php>

Page 10 :

Energie+ <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16759#c6053>

Page 11 :

Degrifstore <http://www.degrifstore.com/contents/fr/d146.html>

Page 13 (et poster) :

Technoblog <https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/>

Chimix <http://www.chimix.com/an8/sup/min60.htm>

Page 14 :

Wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Rankine

MINES ParisTech <http://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cycles-orc.html>

Page 15 :

Wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling

MINES ParisTech <http://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cycles-orc.html>

Page 20 :

Wikipedia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Miroir_ardent

Page 23 :

LABOTHAP Université de Liège

http://www.labothap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales_solaires_SQ070925.pdf

Page 24 :

Foroactivo <http://inter-rev.foroactivo.com/t247p25-buscando-fuentes-de-energia-para-el-montruo>

Wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_PS10

ANNEXE

BILAN PERSONNEL DU PROJET

Justine ABGRALL

« Je me suis toujours intéressée aux énergies renouvelables, surtout l'éolien et l'énergie marémotrice, cependant je ne connaissais pas bien le principe des concentrateurs solaires. Ce projet m'a donc beaucoup intéressée et a confirmé mon envie de travailler dans le domaine des énergies renouvelables. J'ai été surprise de découvrir la puissance des concentrateurs solaires mais qu'à cause d'enjeux économiques et politiques il est très difficile de créer de telles centrales à concentration solaire. J'ai beaucoup aimé travailler sur ce projet, le fait que nous étions tous motivés à l'idée de travailler sur ce sujet a créé une bonne entente au sein du groupe. Nous nous sommes bien répartis le travail dès le début grâce à un calendrier réalisé à la première séance et cela nous a permis de terminer le projet sereinement. Ce projet a donc été pour moi une expérience très enrichissante pour ma culture personnelle mais également sur l'organisation du travail en groupe. »

Najla BEN YOUSSEF

« J'ai été assez contente d'avoir eu « concentrateur solaire et production électrique » comme projet de physique. En effet, j'avais effectué des recherches auparavant sur ce sujet et j'ai été passionnée par les miroirs ardents d'Archimède. J'ai choisi ce sujet car c'était pour moi l'occasion d'approfondir mes connaissances, d'en savoir plus sur ce procédé, et de mettre en application les connaissances acquises en optique et en thermodynamique, vues durant les deux premières années en STPI. J'ai notamment été assez impressionnée par les résultats de nos expériences et par le pouvoir solaire. Quant au travail de groupe, nous avons été en accord tout au long du projet et nous avons bien su gérer notre temps. Nous étions également tous motivés pour le faire avancer et réussir notre projet qui a été pour moi une expérience très enrichissante. »

Rémi GROSSEGEORGE

« Ce projet a été très intéressant pour découvrir un nouveau procédé de production électrique grâce au solaire. En effet, je connaissais le photovoltaïque mais je n'avais que très peu de connaissance sur le solaire thermodynamique. Au cours de ce projet j'ai donc pu faire un lien entre les différentes matières enseignées durant les deux premières années de STPI et ce projet. Cela était très enrichissant car cela permet de rendre plus concret les concepts théoriques vus en cours. De plus, ce projet m'a permis de travailler en groupe où il y avait une bonne entente ce qui a permis de travailler dans les meilleures conditions. »

Maxime HEGO

« J'ai toujours été intéressé par les énergies vertes. Je connaissais globalement le principe d'un concentrateur solaire, cependant, ce projet m'a beaucoup appris que ce soit sur les différents types de concentrateurs, leurs différences, ou sur la partie thermodynamique pour la production électrique, complétant les cours de première année. J'ai aussi pu prendre conscience des enjeux politiques et socio-économiques limitant le développement de ces centrales solaires. Enfin, ce travail de groupe sur plusieurs mois a permis d'appréhender un aspect du métier d'ingénieur : écoute, coordination d'un projet, respect des délais... Cela a été très enrichissant. J'ai également beaucoup apprécié l'entente et la cohésion du groupe. »

Matthieu LEVACHER

« Ce projet m'a permis de découvrir les concentrateurs solaires qui m'étaient inconnus auparavant. J'ai donc découvert un nouveau moyen de production électrique solaire qui promet de se développer dans un futur proche. Cette étude m'a réellement intéressé et a permis d'accroître ma culture personnelle concernant les énergies vertes, qui sont indispensables aujourd'hui. Concernant l'organisation, nous nous sommes très bien entendus et organisés, et avons travaillé efficacement pour mener à bien ce projet. De plus, ce dernier a permis d'appliquer certaines matières étudiées pendant le cycle STPI. Ce projet a donc été pour moi très enrichissant et agréable à réaliser. »

Marion SCHAEFFER

« Avant ce projet, je ne connaissais que les concentrateurs solaires utilisés chez des particuliers afin de chauffer l'eau. J'ai donc pu découvrir au fur et à mesure le potentiel de cette source d'énergie pour une production de masse, mais aussi les débats et enjeux qu'elle suscite. Sur le plan personnel, ce projet a été un des plus agréables que j'ai mené. En effet, travailler avec des gens que nous ne connaissons pas au départ nous a permis d'être plus rigoureux, plus sérieux et plus à l'écoute dans notre travail. De plus, l'entente et les efforts de chacun dans le groupe ont été très agréables. »