



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par :

**M<sup>elle</sup> BOUDJELAL Sarra**

Sur le thème

---

## **Mise en place et caractérisation optique d'un concentrateur linéaire de Fresnel.**

---

Soutenu publiquement le 13 Juillet 2021 à Tlemcen devant le jury composé de :

M <sup>elle</sup> BOUTASTA Amel	MCB	Université de TLEMCCEN	Président
Mr BABA AHMED Nassim	MCA	Université de TLEMCCEN	Encadrant
Mme SARI-ALI Inchirah	MCB	Université de TLEMCCEN	Examineur
Mr KARAOUZENE Lotfi Ibrahim	MCB	Université de TLEMCCEN	Examineur

*Année Universitaire : 2020 ~ 2021*



*Je dédie ce modeste travail :*

*La lumière de ma vie ,*

*A ma très chère mère quoi que je fasse ou que je dise , je ne saurai point te remercier comme il se doit . ta bienveillance me guide et ta présence à mes cote a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*A mon très cher père tu as toujours été à mes côté pour me soutenir et m'encourager que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*A tous mes frères et ma grande mère*

*A tous mes amis sans exception*

**M<sup>elle</sup> BOUDJELAL Sarra**

## REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.

On m'aurait dit au début de la rédaction que les remerciements seraient la partie la plus difficile à écrire, je n'y aurais pas cru. Et pourtant, je peux le confirmer maintenant. Ils représentent bien souvent la partie la plus lue d'un mémoire de thèse, ou du moins celle qu'un lecteur regardera naturellement en premier. Il s'agit donc de trouver les mots justes pour chacun, tout en n'oubliant personne. Je commencerai donc par remercier toute personne que j'aurais pu malencontreusement oublier par la suite. Contrairement aux idées reçues, une thèse n'est pas le résultat d'un travail purement personnel. Au-delà d'être une expérience scientifique incroyable, c'est également une aventure humaine inoubliable qui m'a permis de rencontrer et côtoyer des personnes extraordinaires, qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail. C'est donc naturellement et en toute sincérité que je vais maintenant remercier l'ensemble des personnes qui m'ont entourée pendant ces quelques années !

Je remercie vivement et chaleureusement mon encadreur Docteur BABA AHMED Nassim Maître de conférences « A » à l'université de Tlemcen. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour son aide technique, scientifique et morale ; pour son encouragement et surtout pour la patience et la disponibilité dont il a fait preuve à mon égard.

Je tiens ensuite à adresser mes remerciements à l'ensemble des membres du jury pour le temps qu'ils ont accordé à la relecture du manuscrit.

Je remercie en particulier Madame BOUTASTA Amel Maître de conférences « B » à l'université de Tlemcen de vouloir présider le jury de ce Master. Je suis très honorée par la présence de Madame SARI-ALI Inchirah Maître de conférences « B » à l'université de Tlemcen et Mr KARAOUZENE Lotfi Ibrahim Maître de conférences « B » à l'université de Tlemcen et je les remercie pour avoir accepté de siéger dans ce jury en tant que examinateurs. Je remercie tous les membres du jury pour leur expérience et leur regard critique qu'ils ont porté sur mon travail.

# TABLE DES MATIERES

Dédicace .....	I
Remerciement .....	II
Table des matières .....	III
Introduction générale .....	01
<b>Chapitre 1 : Notions générales sur les collecteurs de type linéaires de Fresnel</b>	
Introduction .....	06
Concentration du rayonnement .....	07
Technologie des collecteurs de type linéaire de Fresnel .....	12
Les facteurs de pertes optiques dans les concentrateurs de type linéaire de Fresnel .....	17
Orientation du collecteur .....	19
Les modèles optiques du concentrateur linéaire de Fresnel .....	20
Références bibliographiques .....	21
<b>Chapitre 2 : Mise en place et caractérisation du collecteur linéaire de Fresnel</b>	
Introduction .....	24
Description du collecteur linéaire de Fresnel .....	24
Modélisation du collecteur linéaire de Fresnel .....	25
Conclusion .....	30
Références bibliographiques .....	30
<b>Chapitre 3 : Résultats et interprétations</b>	
Introduction .....	33
Interprétation des résultats .....	33
Conclusion .....	42
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>44</b>

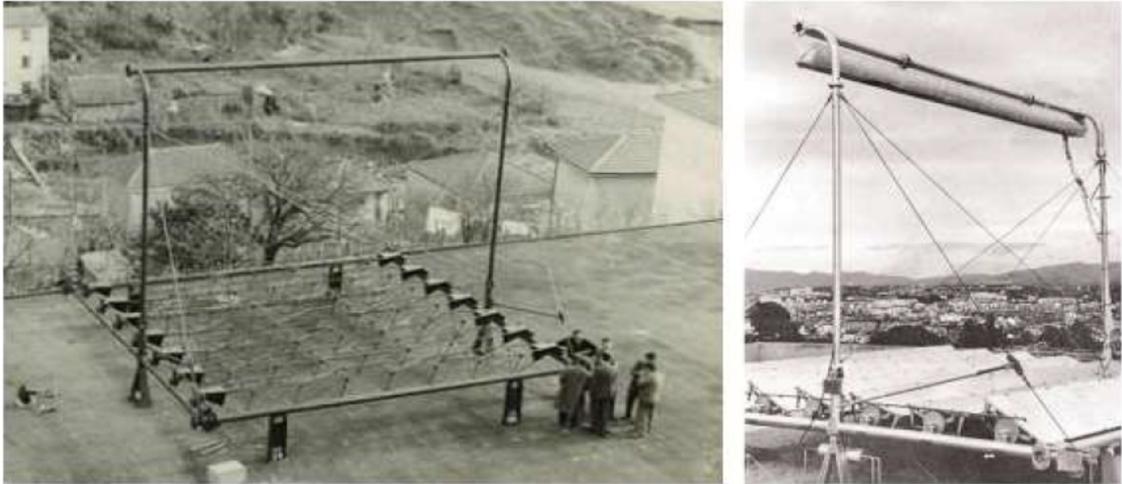
---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

Les énergies renouvelables comptent pour près de la moitié de l'augmentation de la production électrique mondiale jusqu'en 2035. Le paradoxe c'est que 74 % du continent africain reçoit un ensoleillement moyen annuel de 1900 kWh/m<sup>2</sup>/an qui est favorable au développement des centrales solaires à concentration. Le développement des énergies renouvelables, notamment de l'énergie solaire abondante permettra sans doute à ces pays d'accélérer leur développement économique. Les pays Africains et surtout subsaharien ont un faible taux d'accès à l'électricité. En zone urbaine, le taux moyen est de 63 %. Le constat est encore plus alarmant dans les zones rurales. En 2016, le taux d'électrification était de 23 % en général avec moins de 5 % dans certains pays [1]. En plus du faible taux d'électrification, ces régions subissent des délestages dans l'approvisionnement de l'électricité [2]. En raison de la faible densité des populations, les mini-réseaux sont les plus adaptés pour les zones rurales [3]. Les programmes d'électrification des zones rurales utilisent le plus souvent des groupes électrogènes, des centrales photovoltaïques avec ou sans batteries de stockage ou des systèmes hybrides photovoltaïques et groupes électrogènes. L'utilisation des combustibles fossiles, dans les groupes électrogènes, est très coûteuse et engendre de la pollution. La technologie du photovoltaïque est une bonne alternative à ce problème. Cependant, le stockage d'énergie dans les batteries est très coûteux. Les centrales sans stockage d'énergie ne répondent pas au besoin en énergie des populations, car il n'y a aucune production en absence de soleil. Pour cela, les petites centrales en réseau isolées utilisant la technologie du solaire à concentration semblent être une alternative intéressante à cette difficulté. Les systèmes solaires à concentration se subdivisent en deux grandes familles : d'une part les collecteurs à récepteur ponctuel que sont les paraboles et les centrales à tours et d'autre part les collecteurs ayant un récepteur linéaire que sont les cylindro-paraboliques et les linéaires de Fresnel. Parmi ces quatre technologies de systèmes solaires à concentration, le linéaire de Fresnel apparaît comme la plus adaptée aux zones rurales d'Afrique. En effet, il s'agit d'une technologie simple et nécessitant des coûts d'investissements moindres avec un fort potentiel de réduction des coûts de revient. La Figure 1 montre le premier collecteur de type linéaire de Fresnel construit et caractérisé en 1964 à Marseille par Giovanni Francia [4,5].

Les travaux de Giovanni Francia ont depuis lors été repris par plusieurs chercheurs qui ont conçu différents collecteurs de type linéaire de Fresnel. Les collecteurs de type linéaire de Fresnel sont commercialisés depuis quelques années par Industrial Solar anciennement Mirroxx, Novatec Solar devenu en 2015 Frenell, Solar Power Group, CNIM group à travers sa filiale SUNCNIM, CSP Services, Alsolen, Himin Solar, China Huaneng Group, KGDS Renewable Energy, BB Energy, Hyperlight Energy, Elianto etc.



**Figure 1** : Le premier collecteur de type linéaire de Fresnel développé par Giovanni Francia [4]

Le présent travail de Master consiste à confirmer des résultats trouvés dans la littérature afin de pouvoir concevoir un prototype de concentrateur solaire composé de miroirs plans de Fresnel pour concentrer le rayonnement au niveau du récepteur. L'utilisation de matériaux locaux et d'une technologie simplifiée sera privilégiée dans le but de faciliter le transfert potentiel de la technologie. L'objectif pour nous sera donc de déterminer la mise en place en corrigeant les dysfonctionnements et de caractériser les performances optiques du concentrateur. L'intérêt certain est de déterminer les caractéristiques optiques du prototype en vue de l'optimiser et comparer les résultats à ceux des installations existantes.

Le présent document est structuré en trois grandes parties :

- Une synthèse bibliographique sur les concentrateurs de Fresnel ;
- Une partie présentant la mise en place du système de concentration et le programme de suivi sous Python combiné avec Soltrace ;
- La dernière partie porte sur les modestes résultats de la simulation afin de valider le fonctionnement du prototype.

#### Référence :

- [1] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook (WEO) 2016 Electricity Database: electricity access in 2014 — regional aggregates. International Energy Agency (IEA); 2016. n.d.
- [2] IRENA report on Solar PV in Africa - Costs and Markets | UNFCCC n.d. <https://unfccc.int/news/irena-report-on-solar-pv-in-africa-costs-and-markets> (accessed August 30, 2018).
- [3] IRENA. Innovation Outlook: Renewable Mini-grids. 2016.

- [4] Silvi C. The pioneering work on linear Fresnel reflector concentrators (LFCs) in Italy. Proc SolarPACES 2009.
- [5] Francia G. Pilot plants of solar steam generating stations. Sol Energy 1968;12:51–64. doi:10.1016/0038-092X(68)90024-8.

---

# **CHAPITRE 1 :**

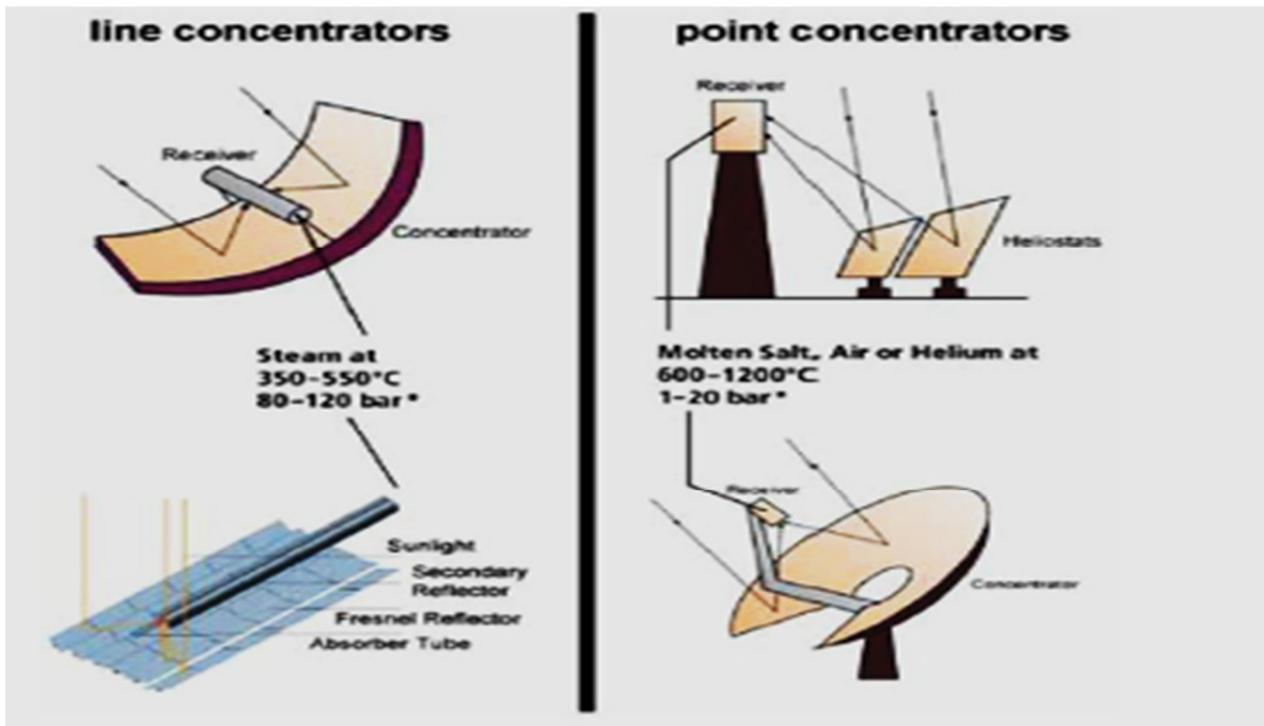
**Notions générales sur les collecteurs de type  
linéaires de Fresnel**

---

**Introduction :**

Le contexte de crise de civilisation nous pousse à changer notre mode de fonctionnement. Sur le plan énergétique, nous devons réduire notre consommation et produire notre énergie dans le plus grand respect de la nature. Les technologies solaires participent à cet objectif. L'énergie solaire thermique à basse température pour les besoins du bâtiment ne demande qu'à être généralisée. L'énergie photovoltaïque est proche de la compétitivité pour la production d'électricité. La troisième famille de technologies est l'énergie solaire thermodynamique, qui fait appel à la concentration du rayonnement solaire. Cette énergie héliothermodynamique a un atout majeur : le stockage de l'énergie solaire sous forme thermique. L'énergie héliothermodynamique est de plus en plus connue du grand public. Le potentiel de cette énergie renouvelable est reconnu et suscite un intérêt croissant. En effet, plusieurs caractéristiques en font une bonne candidate pour la production d'énergie notamment électrique. La possibilité de stocker l'énergie thermique est très avantageuse : la production d'électricité est moins dépendante de la ressource solaire instantanée et peut être mieux ajustée en fonction de la demande. Le stockage est d'ailleurs nécessaire pour assurer la stabilité du réseau électrique avec une grande part d'énergies renouvelables dans la production. L'héliothermodynamique avec stockage thermique est donc une technologie clé pour augmenter la pénétration des énergies renouvelables dans le mix énergétique. La technologie à miroirs cylindro-paraboliques est la plus mature. Elle bénéficie en particulier de l'expérience acquise à travers les centrales californiennes SEGS. Ces centrales construites dans les années 1980 sont encore en fonctionnement. Preuve est donc faite de la validité et de la durabilité de cette technologie. Pour exploiter de façon optimale la ressource solaire, d'autres technologies paraissent même plus prometteuses : en particulier les centrales à tour, pour leur rendement, et les concentrateurs linéaires de Fresnel, pour leur coût. L'attention se focalise principalement sur la production d'électricité. Mais d'autres applications de l'énergie solaire concentrée sont très prometteuses : la génération de combustibles, ou de matériaux, le dessalement d'eau de mer ou la purification d'eau, ainsi que tous les systèmes de polygénération (électricité, chaleur, froid...). Les options d'hybridation et surtout de stockage d'énergie thermique sont cruciales au secteur de la production électrique à grande échelle. Les centrales solaires sont une technologie relativement récente, possédant un important potentiel de développement. Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés et les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des états unis, l'Amérique du sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du moyen orient, les plaines désertiques d'inde et du Pakistan, la chine, l'Australie, etc.

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante. La figure 1.1 montre les 4 principaux systèmes de concentration. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels [1].



**Figure 1.1** : principale technologie de concentration solaire

La technologie sur laquelle nous avons travaillé est un concentrateur de type linéaire de Fresnel. Nous abordons en premier lieu quelques éléments théoriques qui visent à mieux comprendre la concentration du rayonnement et le principe de l'optique, associée aux réflecteurs linéaires de Fresnel.

**1. Concentration du rayonnement** : Pour concentrer un rayonnement, les rayons incidents doivent être parallèles. En pratique, on concentre des rayons qui proviennent d'un angle solide réduit. Le soleil est à une distance  $D_{S-T} = 1,505 \cdot 10^8 m$  de la Terre. Son rayon mesure  $R_S = 6,9599 \cdot 10^8 m$ . Le soleil est donc vu depuis la Terre sous un cône de demi-angle d'ouverture :

$$\theta_S = \sin^{-1}\left(\frac{R}{D}\right) = 16' = 4,65 \text{ mrad}$$

Pour rappel, un angle solide élémentaire  $d\Omega$  s'exprime par  $d\Omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$  en fonction de  $\theta$  angle entre la normale à la surface et l'élément d'angle solide et  $\varphi$  angle de révolution autour de la normale à la surface.

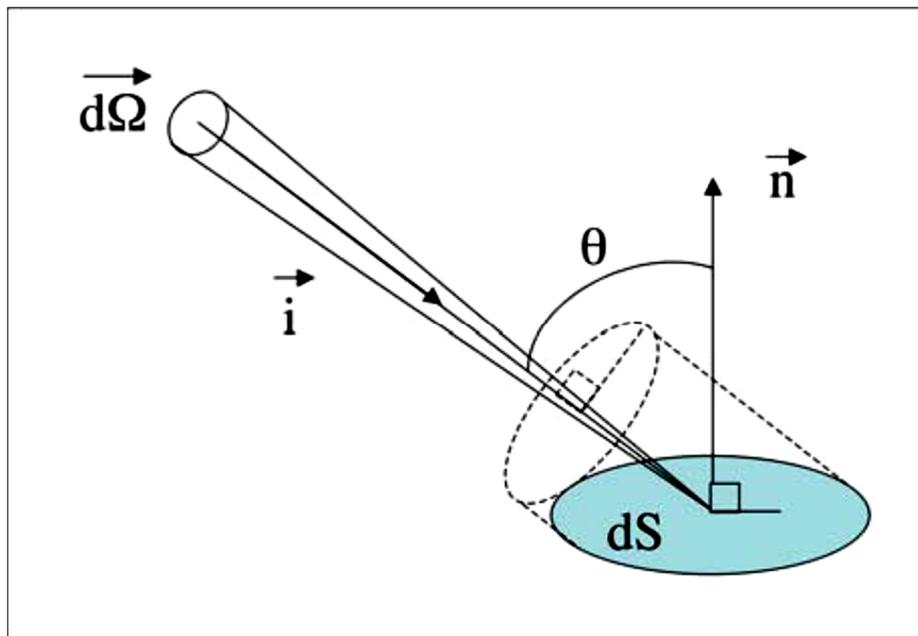
Le soleil, vu de la Terre, correspond à un angle solide :

$$\Omega_{S/T} = \int_{sun} d\Omega = \int_{\theta=0}^{\theta=\theta_S} \sin \theta \cdot d\theta \cdot \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} d\varphi = (1 - \cos \theta_S) \cdot 2 \cdot \pi = 6,79 \cdot 10^{-5} sr$$

On note  $L_{S/T}$  la luminance ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ) sur la Terre en provenance du soleil. La puissance interceptée par une surface normale sur la Terre est en moyenne de  $\Phi_{S-T} = 1360 W \cdot m^{-2}$  hors atmosphère. La luminance  $L_{S/T}$  est liée à la puissance  $\Phi_{S-T}$  par la relation :

$$L_{S/T} = \frac{\Phi_{S/T}}{\Omega_{S/T}}$$

$$L_{S/T} =$$



**Figure 1.2 :** Illustration de « l'effet cosinus »

Il est intéressant de voir la concentration comme une démultiplication du soleil. Il ne s'agit pas d'une superposition, mais d'une juxtaposition d'images du soleil. On comprend alors facilement qu'il existe une limite à la concentration.

La concentration maximale est atteinte lorsque le récepteur de surface  $dS$  reçoit la luminance du soleil  $\Phi_{S-T}$  de toutes les directions de l'hémisphère. Le récepteur  $dS$  reçoit alors, de chaque direction, une puissance  $d\Phi_{S/dS}$  réduite proportionnellement au cosinus de l'angle d'incidence  $\theta$  du rayonnement (illustration de « l'effet cosinus » : figure 1.1) :

$$d\Phi_{S/dS} = |\vec{i} \cdot \vec{n}| \cdot d\Omega \cdot$$

$$\Phi_{S/T} = \cos \theta \cdot d\Omega \cdot \Phi_{S/T}$$

La puissance  $\Phi_{S/dS}$  ( $\text{W/m}^2$ ), reçue du soleil non concentré, par le récepteur dS est alors l'intégrale de la puissance élémentaire sur le soleil :

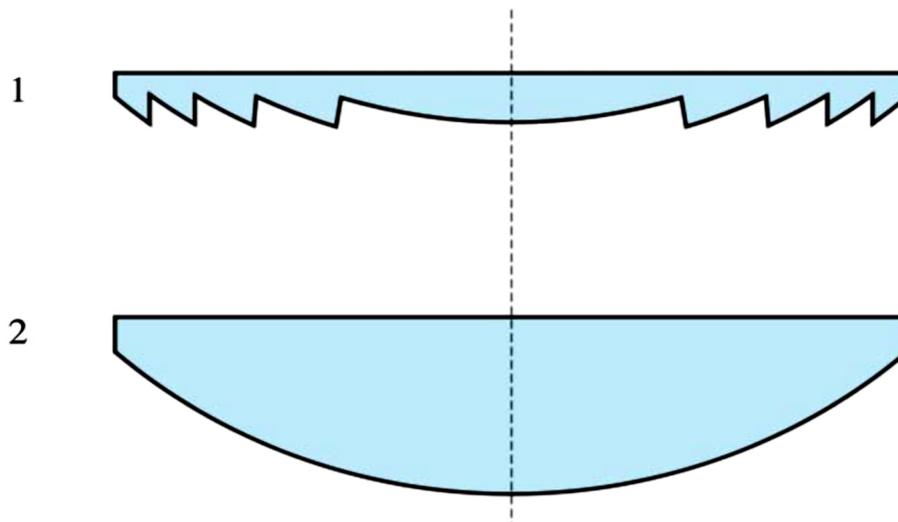
$$\begin{aligned}\Phi_{S/dS \text{ soleil}} &= \int_{\text{sun}} d\Phi_{S/dS} = \Phi_{S/dS} \cdot \int_{\theta=0}^{\theta=\theta_S} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} d\rho \\ &= (1 - \cos^2 \theta_S) \cdot \pi \cdot \Phi_{S/dS} = 6,79 \cdot 10^{-5} \cdot \Phi_{S/dS}\end{aligned}$$

Et la puissance  $\Phi_{S/dS \text{ max}}$  ( $\text{W/m}^2$ ), reçue du soleil non concentré, par le récepteur dS est alors l'intégrale de la puissance élémentaire sur tout l'hémisphère :

$$\Phi_{S/dS \text{ max}} = \int_{\text{hémisphère}} d\Phi_{S/dS} = \Phi_{S/dS} \cdot \int_{\theta=0}^{\theta=\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} d\rho = \pi \cdot \Phi_{S/dS}$$

Le facteur de concentration maximal est donc :  $C_{\text{max}} = \frac{\Phi_{S/dS \text{ max}}}{\Phi_{S/dS \text{ soleil}}} \approx \frac{\pi}{\Omega_{S/\tau}} \approx 46200$

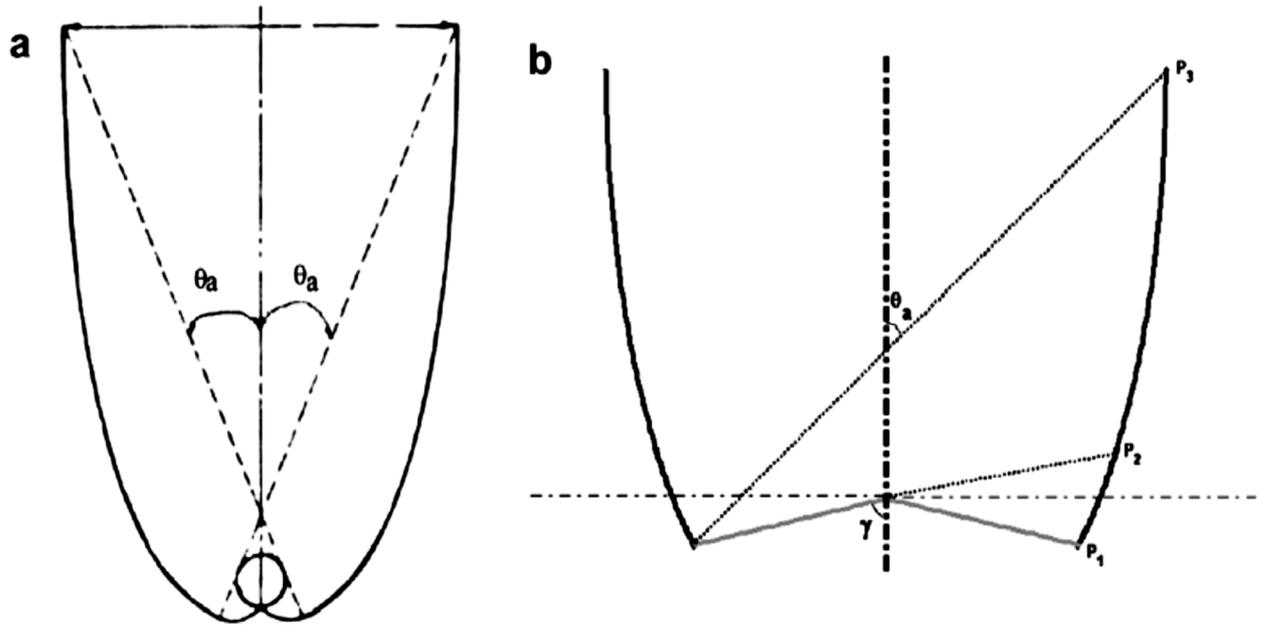
On peut expliquer la concentration maximale par la température : il est impossible d'atteindre une température supérieure à celle du soleil par concentration. Dans les concentrateurs linéaires de Fresnel, le facteur de concentration reste assez faible de l'ordre de quelques dizaines de fois. Pour de plus hautes concentrations, on fait appel à des concentrateurs ponctuels : centrales à tour, paraboles. On peut atteindre des facteurs de concentration de 1000 à 10000. La concentration maximale réalisable en pratique est de l'ordre de 20000. Au-delà, la mise en œuvre devient très difficile. On parle de concentrateur linéaire de Fresnel par analogie avec les lentilles de Fresnel. Le savant Augustin Fresnel (1788-1827) a développé ces lentilles en particulier pour les phares marins. Le principe, illustré sur la figure 1.3, consiste à découper une lentille pleine circulaire en plusieurs anneaux concentriques. Optiquement, la masse de verre joue le même rôle, quelle que soit la distance de verre traversée. L'important est de conserver l'angle des surfaces externes de la lentille. Les rayons incidents parallèles à l'axe se comporteront de la même manière dans les deux lentilles. De la même manière, on peut obtenir une lentille linéaire de Fresnel par un découpage en bandes. Pour distinguer les lentilles des miroirs, on parlera de réflecteurs de Fresnel.



**Figure 1.3 :** Principe d'une lentille de Fresnel (1) et la lentille pleine équivalente (2) (source : Wikipédia, article "lentille de Fresnel")

Il existe différents types de sur-concentrateurs. Ces dispositifs, ajoutés au récepteur, permettent d'augmenter le facteur de concentration du système. Ils rabattent le rayonnement sur l'absorbeur qui peut ainsi être plus petit. On limite donc, par là même, les pertes thermiques. Les sur-concentrateurs font partie de la famille des dispositifs optiques non-imageants. Par opposition aux systèmes optiques pour l'astronomie ou la microscopie, nous n'avons pas besoin d'obtenir une image précise de la source observée. Pour la concentration, ce qui importe est que l'ensemble du flux soit collecté dans la zone de l'absorbeur. L'approche est donc différente, quand il s'agit de concevoir les sur-concentrateurs. Il en existe de plusieurs sortes :

- *Miroirs plans inclinés* : Le plus simple est un réflecteur plan placé de part et d'autre de l'absorbeur. Le facteur de concentration reste limité, car l'angle d'inclinaison du miroir ne peut être très élevé. Il sera d'autant plus faible que l'angle d'ouverture souhaité est élevé. Une autre limite est l'encombrement de l'ensemble.
- *Réflecteur à l'arrière de l'absorbeur* : On peut aussi placer un réflecteur plan, ou cylindrique, ou de forme quelconque, à l'arrière du ou des tubes absorbeurs. L'objectif est de rabattre le rayonnement sur l'arrière de l'absorbeur. La répartition plus homogène du flux radiatif sur les tubes est positive pour la durée de vie du matériel. L'échange thermique est aussi amélioré.
- *Réflecteurs paraboliques composés* : Pour mettre à profit le plus possible le rayonnement déjà concentré qui atteint le récepteur, on fait souvent appel à des systèmes un peu plus avancés. On utilise des réflecteurs secondaires de type Concentrateur Parabolique Composé (CPC). Le principe est d'utiliser plusieurs portions de paraboles distinctes pour concentrer au mieux les rayons sur une cible non ponctuelle. Nous pouvons distinguer deux types, comme l'illustre la figure 1.4 :



**Figure 1.4 :** Concentrateurs secondaires de type CPC : “fermé” (a) et “ouvert” (b)

- les CPC “fermés” : les sections de paraboles sont jointes et forment une cavité. La zone focale, où est situé l’absorbeur, se trouve dans cette cavité.
- les CPC “ouverts” : les sections de paraboles sont disjointes. L’ouverture correspond à la zone focale, où est l’absorbeur.

Il existe des CPC linéaires (2D), pour une cible linéaire, et des CPC de révolution (3D), pour une cible “ponctuelle”. Dans tous les cas, le CPC est caractérisé par un angle d’ouverture  $2 \cdot \theta_a$ . Tout rayon incident avec un angle  $\theta < \theta_a$  est réfléchi dans la zone focale. Avec  $\theta > \theta_a$ , le rayon est perdu.

Le facteur de concentration maximal  $C_{max}$  d’un CPC est pour des raisons géométriques :

- $C_{max} = \frac{1}{\sin \theta_a}$  pour un CPC linéaire,
- $C_{max} = \frac{1}{\sin^2 \theta_a}$  pour un CPC ponctuel.

➤ *CPC “ouvert”* : Le rayon d’ouverture du CPC est  $r_{in}$ . Il se réduit à  $r_{out}$  au niveau de la zone focale. Chaque portion de parabole est telle que son point focal coïncide avec l’extrémité de la portion de parabole opposée, au bord de la zone focale. L’axe de la parabole est incliné de l’angle d’ouverture  $\theta_a$ . Ainsi, un rayon incliné au maximum sera réfléchi exactement sur le bord de la zone focale. Tout rayon moins incliné par rapport à l’axe du CPC sera également réfléchi sur la zone focale.

➤ *CPC “fermé”* : Un CPC fermé se rencontre surtout en concentration linéaire. Ainsi, le tube absorbeur est également éclairé sur sa partie arrière, donc de manière plus homogène. Chaque côté du CPC peut être composé d’une, ou plusieurs portions de paraboles.

Les CPC simples, avec une seule portion de parabole pour chaque côté, sont par exemple utilisés dans certains capteurs solaires thermiques plans avec tubes sous vide. Pour des tubes plus gros, on a souvent recours à deux portions de paraboles : une pour l'avant du concentrateur et une pour la volute intérieure, à l'arrière du tube.

On peut optimiser les performances optiques des CPC en décomposant plus finement leur forme. Une étude spécifique est nécessaire pour chaque configuration de récepteur (géométrie de la surface absorbante : tube, triangle, plan...).

**2. Technologie des collecteurs de type linéaire de Fresnel :** Parmi les technologies de solaire thermodynamique, la technologie du linéaire de Fresnel semble la plus adaptée aux régions chaudes comme en Afrique. Cela en raison de la simplicité de la technologie des concentrateurs Fresnel qui connaît de nos jours un intérêt particulier comme la plateforme de test Fresdemo à Almería 'Tabernas' en Espagne qui appartient à 'Solar Power Group'. Cette plateforme a pour but la génération directe de la vapeur à l'intérieur des tubes sous vide alimentés en eau liquide, permet de produire de la vapeur à 450 °C avec une puissance thermique de 800 kW. En vue de l'optimisation des performances et des échanges thermiques dans la zone de concentration du rayonnement solaire, Panna et al. ont menés une étude expérimentale sur un concentrateur à réflexion linéaire Fresnel, dont la cavité de concentration de forme trapézoïdale, est munie de deux types de pipes respectivement circulaire et rectangulaire utilisés comme espace absorbeur [2].

Le concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel (LFC) est généralement composé de :

- Miroirs de Fresnel : plusieurs bandes de miroirs réfléchissent et concentrent le rayonnement sur le récepteur.
- Récepteur : positionné au-dessus du miroir de Fresnel, il intercepte le rayonnement concentré.

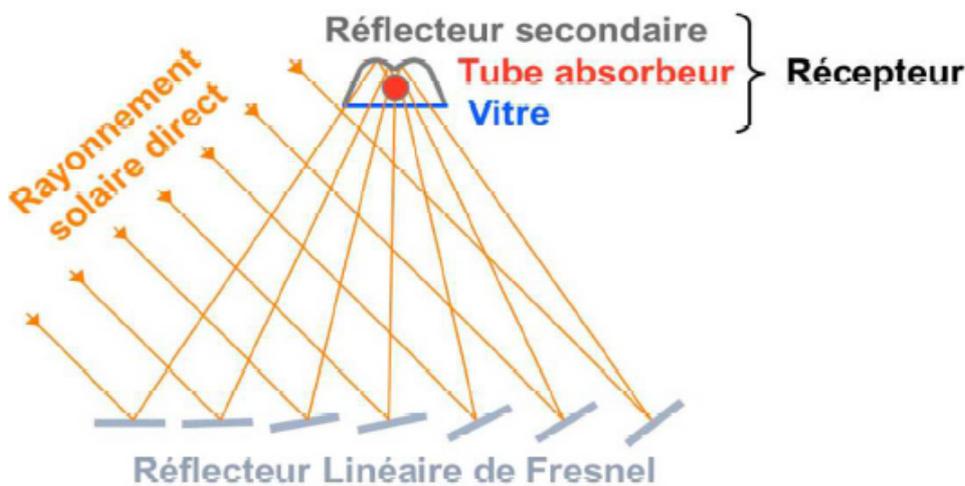
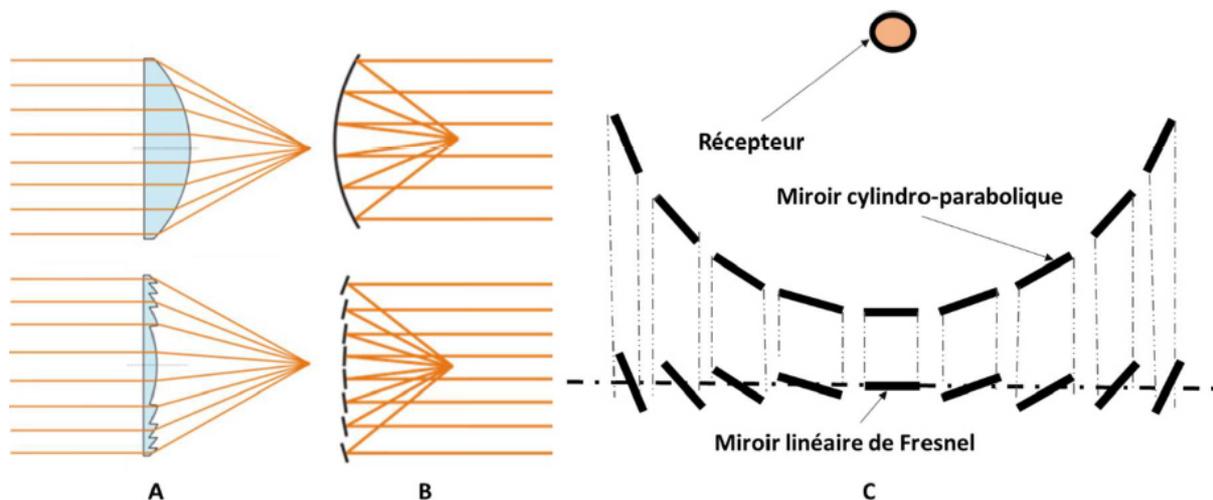


Figure 1.5 : Le concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel

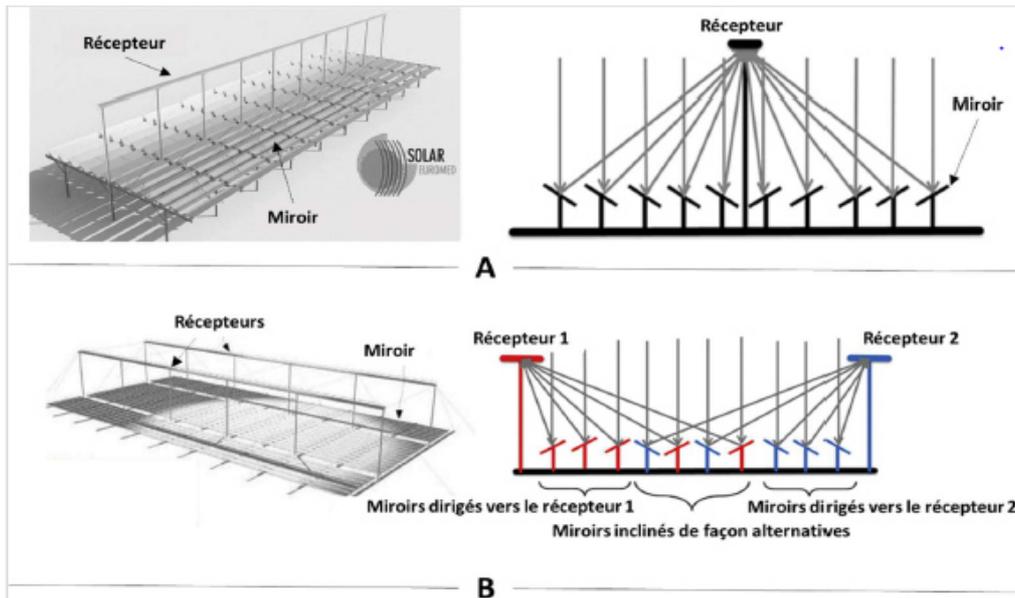
**2.1. Description d'un concentrateur de type linéaire de Fresnel :** Le concentrateur de type linéaire de Fresnel est en substance un concentrateur de type cylindro parabolique où le miroir est segmenté en adoptant le principe de segmentation de Fresnel avec les lentilles comme illustré à les Figure 1.6A et 1.6B. La figure 1.6C montre que tous les segments de ligne appelés réflecteurs reviennent sur le même axe. Les réflecteurs doivent être légèrement incurvés et le rayon de courbure de chaque réflecteur dépend de sa position. Par conséquent, le condenseur de Fresnel linéaire se compose de plusieurs réflecteurs. Le réflecteur est agencé pour refléter toute lumière solaire incidente sur sa surface vers le récepteur situé sur le dessus du concentrateur



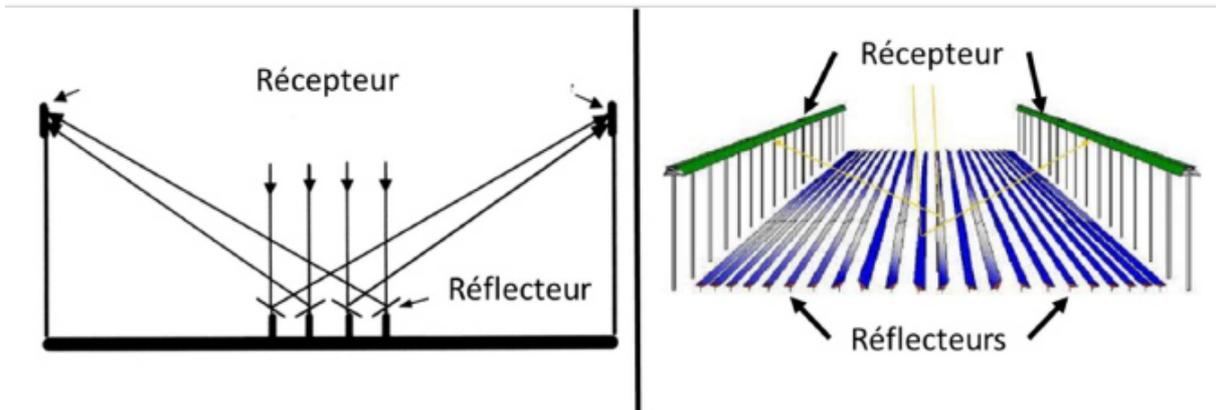
**Figure 1.6 :** A- lentille de Fresnel ; B- miroirs de Fresnel ; C- schéma illustrant le passage du miroir cylindro-parabolique au miroir linéaire de Fresnel

Cependant, Bien que les réflecteurs incurvés puissent fournir de meilleurs rendements, Les concentrateurs de type linéaire de Fresnel se distinguent par le nombre de récepteurs, la largeur des réflecteurs et de tout autre élément distinctif [3].

**2.2. Les concentrateurs linéaires de Fresnel compact :** En fonction du nombre de récepteurs, les concentrateurs de type linéaire de Fresnel peuvent être regroupés en deux grandes familles. Les concentrateurs ayant un seul récepteur, il s'agit de la technologie standard la plus répandue. Et les collecteurs ayant au moins deux récepteurs développés par Mills et Morrison ; ils sont appelés les concentrateurs linéaires de Fresnel compact (CLFR). Les Figure 1.7A et 1.7B donnent respectivement un aperçu d'un collecteur à un récepteur et d'un collecteur à deux récepteurs.



**Figure 1.7 :** A- concentrateur à un récepteur ; B- concentrateur à deux récepteurs  
 Les concentrateurs compacts ont été développés dans le but de réduire les pertes par ombrage et par blocage qui ont lieu avec un concentrateur à un seul récepteur. Les récepteurs peuvent être aux deux extrémités du concentrateur, ou dans le concentrateur. Les réflecteurs situés au centre du concentrateur sont inclinés de manière alternative (Figure 1.8).



**Figure 1.8 :** Schémas d'un concentrateur linéaire de Fresnel compact

Les concentrateurs linéaires de Fresnel compacts permettent de réduire les pertes par ombrage et blocage [3]. Le rendement optique et le rendement énergétique utile sont définis comme suit :

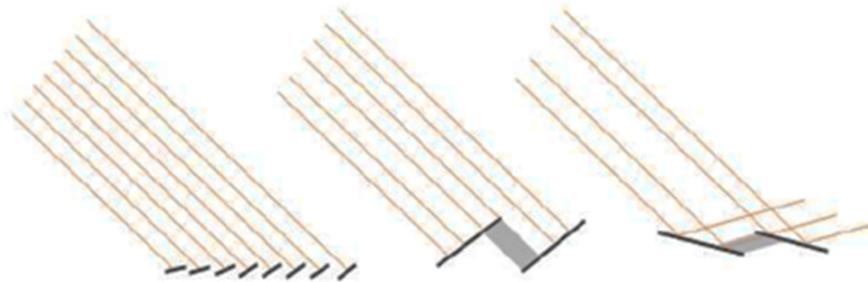
$$\eta_{utile}(\%) = 100 \cdot \frac{E_{inc-récep} \cdot (\varphi \geq \frac{10kW}{m^2})}{DNI \cdot A_{prim}} \text{ où } \varphi \text{ est la densité de flux solaire.}$$

$$\eta_{optique}(\%) = 100 \cdot \frac{I_r}{I_{total}}$$

Le paramètre d'efficacité qui fournit le mieux l'information est l'efficacité énergétique utile, car elle ne tient compte que de l'énergie incidente avec une densité de flux lumineux supérieure à un seuil donné ( $10 \text{ kW/m}^2$ ) pour fournir un travail utile. Un changement de ce dernier est

équivalent à changer le facteur de remplissage pour un nombre donné de miroirs primaires, où le facteur de remplissage est donné par  $FF = \frac{A_{primaire}}{A_{champ.sol}}$ . Ainsi, la largeur optimale du champ solaire équivaut à un optimum.

L'objectif du concept CLFC est de réduire les pertes par ombrage et blocage. Il convient de noter que le blocage et l'ombrage implique miroir. Ceci est dû soit au fait qu'une partie de la surface réfléchissante est ombragée par d'autres miroirs (ombrage), soit au fait que le faisceau réfléchi d'un miroir ne frappe pas le récepteur. Lorsqu'il est intercepté sur son passage par un autre miroir (blocage).



**Figure 1.9** : les pertes optiques des collecteurs de Fresnel : perte de cosinus transversale (à gauche), l'ombrage (centre) et blocage (à droite)

Pour l'évaluation de ces deux pertes, les deux paramètres ont été calculés et rapport annuel de blocage, défini [4] :

$$R_{ombrage} = 100 \cdot \frac{A_{ombrage.primaire}}{A_{primaire}}$$

$$R_{blocage} = 100 \cdot \frac{A_{blocage.primaire}}{A_{primaire}}$$

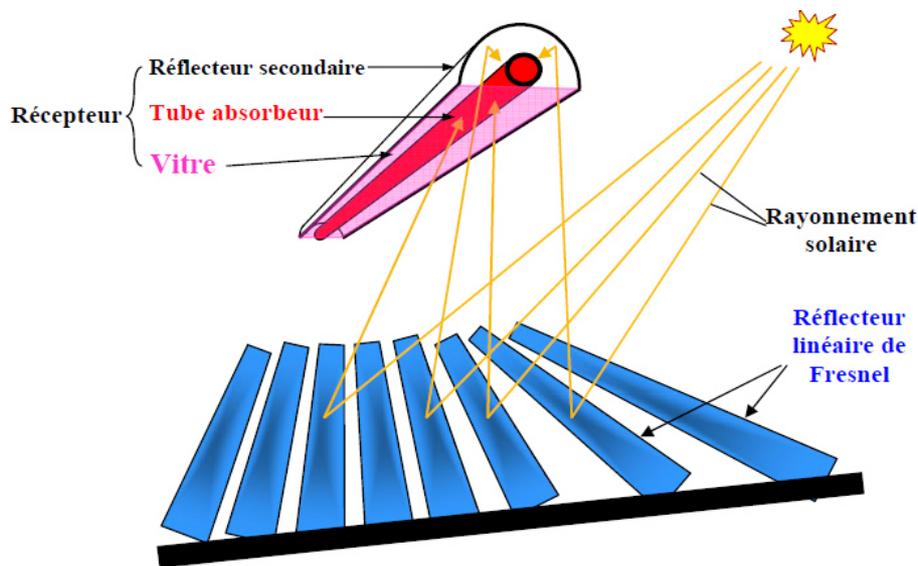
**2.3. Les réflecteurs** : Un premier étage de réflecteurs est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur. Ce second étage de réflecteurs, en plus de réfléchir le rayonnement, joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Il est recouvert d'une importante couche d'isolation en sa partie supérieure. La partie inférieure est quant à elle isolée par une vitre [4].

**2.4. Le récepteur** : Les récepteurs des systèmes de Fresnel réalisés ont une autre structure que les récepteurs de centrales cylindro-parabolique. Il est situé à la focale du concentrateur [3] : positionné au-dessus du miroir de Fresnel, il intercepte le rayonnement concentré. La conception du récepteur peut varier. Il est souvent composé de :

- d'un **réflecteur secondaire**, qui concentre encore d'un facteur 1 à 3 le rayonnement. Il permet de réduire la surface de l'absorbeur, ce qui limite les pertes, par rapport aux

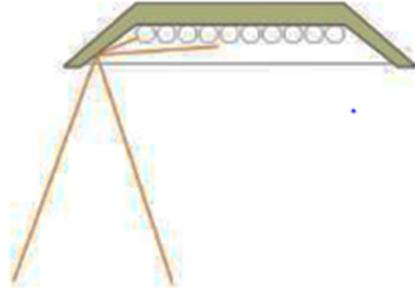
performances de concentration du miroir de Fresnel. Il peut aussi contribuer à l'homogénéité du flux de puissance collecté sur l'élément absorbeur,

- d'un **élément absorbeur** : souvent un tube, mais parfois, plusieurs tubes, voire une surface plane. Cet élément joue le rôle d'échangeur ; le fluide caloporteur collecte l'énergie du rayonnement sous forme d'énergie thermique,
- d'une **vitre**, qui assure une limitation des pertes radiatives. Transparent à la lumière visible, le verre est opaque aux Infrarouge (IR). Le rayonnement solaire entre dans le récepteur, mais les émissions des surfaces chaudes sont en grande partie bloquées par la vitre [6].



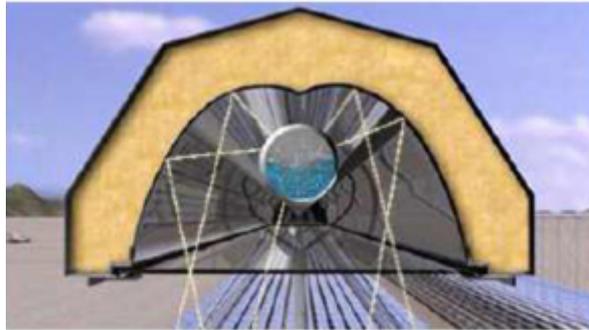
**Figure 1.10** : Présentation schématique d'un récepteur à réflecteur linéaire de Fresnel. La caractéristique la plus attirante est l'existence d'un concentrateur secondaire. Mais aussi les tubes d'absorption sont différents. Le récepteur est placé sur des rouleaux pour compenser la dilatation thermique due aux températures élevées durant le fonctionnement. Le concentrateur secondaire a donc principalement tâche d'augmenter le facteur d'interception. Mais, par conséquent, il a également l'effet que le taux de concentration est plus élevé. Actuellement, il existe deux types de récepteur :

- **Récepteurs multitubes** : la conception multitube la plus conventionnelle, consiste en une série de tubes parallèles disposés horizontalement dans une cavité, généralement de section trapézoïdale et sans concentrateur secondaire.



**Figure 1.11** : le récepteur multitube avec un simple concentrateur secondaire trapézoïdal de société AUSRA

○ **Récepteur à tube unique** : Il est basé sur l'utilisation d'un seul tube (diamètre varie entre 7,5 et 18 cm). Ce tube est situé dans une cavité munie d'un concentrateur secondaire formé comme une double parabole et possédant un couvercle en verre au fond de la cavité [5].



**Figure 1.12** : le récepteur à tube unique avec un concentrateur secondaire de type collecteur parabolique compound de la société Novatec Solar

Le récepteur a pour rôle d'absorber le rayonnement solaire concentré, de le convertir en chaleur sensible et de transmettre cette chaleur au fluide caloporteur qui passe par l'absorbeur. L'absorbeur se trouve au noyau du récepteur. Sa température, pour les collecteurs de type linéaire de Fresnel, peut atteindre des valeurs supérieures à 250 °C.

**2.5. Système de poursuite solaire** : Les héliostats suivent le soleil suivant deux axes, dans ce cas l'ouverture du collecteur sera toujours normale au soleil, par conséquent l'angle d'incidence est zéro tout le long de la journée :  $\cos(\theta) = 1$ . Ce qui signifie que :  $\gamma_{col} = \gamma_{sol}$

Une nouvelle stratégie de poursuite du soleil qui fournit une petite erreur de suivi a été développée. Elle se résume à un système de recherche hybride qui se compose d'une combinaison de stratégies de poursuite en boucle ouverte et en boucle fermée. Dans cette stratégie, les héliostats doivent être placés sur des montures tournant autour de deux axes.

On trouve la monture azimutale, la monture altazimutale et la monture équatoriale [5].

**3. Les facteurs de pertes optiques dans les concentrateurs de type linéaire de Fresnel** : Le principe de la concentration solaire requiert la juxtaposition des images réfléchies par le concentrateur sur le récepteur. Le facteur de concentration géométrique est le rapport entre la

surface des miroirs et la surface de l'absorbeur. Le facteur de concentration local est le rapport entre la densité de flux incident sur l'absorbeur et celle qui est incidente sur le concentrateur. Les pertes optiques désignent tous les phénomènes qui entraînent la réduction du facteur de concentration local ou plus précisément la réduction de la densité de flux incident sur le récepteur. Il y a plusieurs types de pertes optiques : les pertes dues à un mauvais réglage des réflecteurs, les pertes par ombrage, les pertes par blocage (Figure 1.13), l'effet cosinus (Figure 1.14), les pertes dues à la nature du miroir, les pertes par dé-focalisation (Figure 1.15A et les pertes en fin de ligne (Figure 15.B)

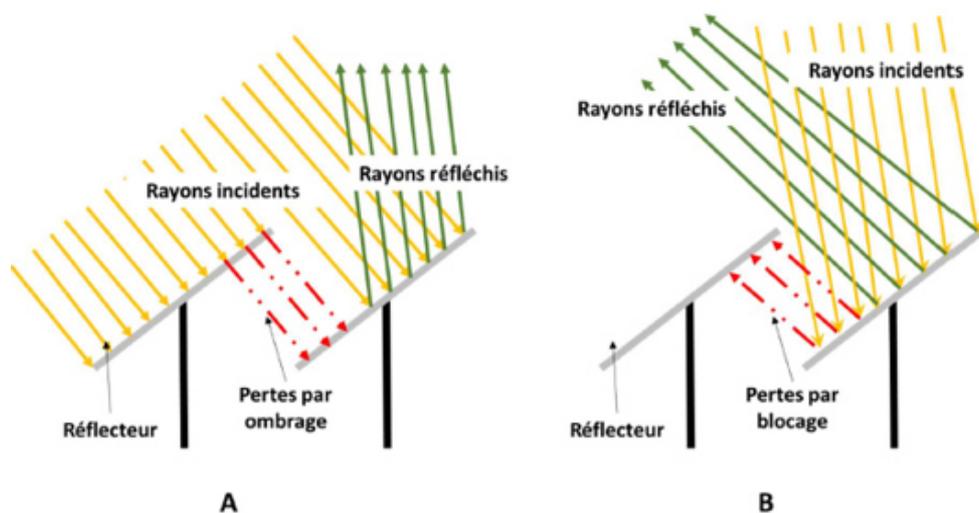


Figure 1.13 : A-illustrations des pertes par ombrage ; B-illustration des pertes par blocage.

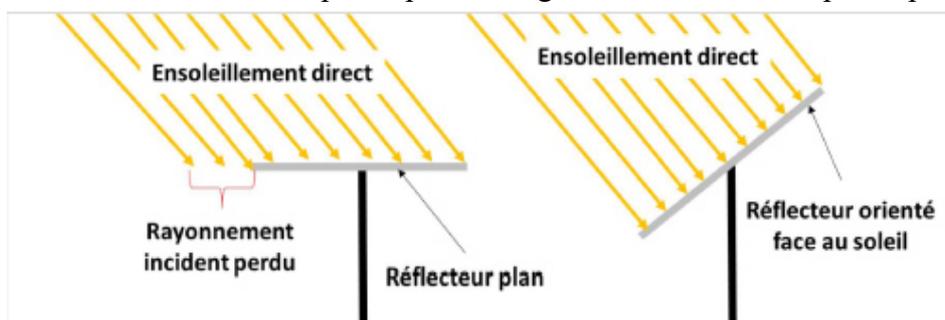
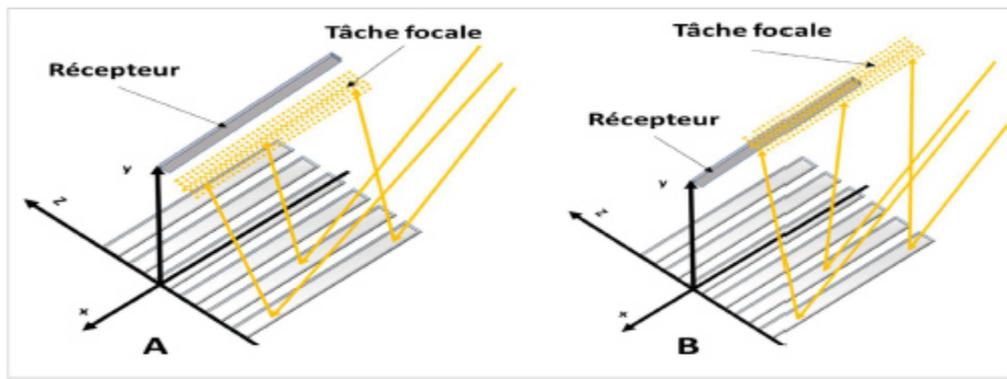


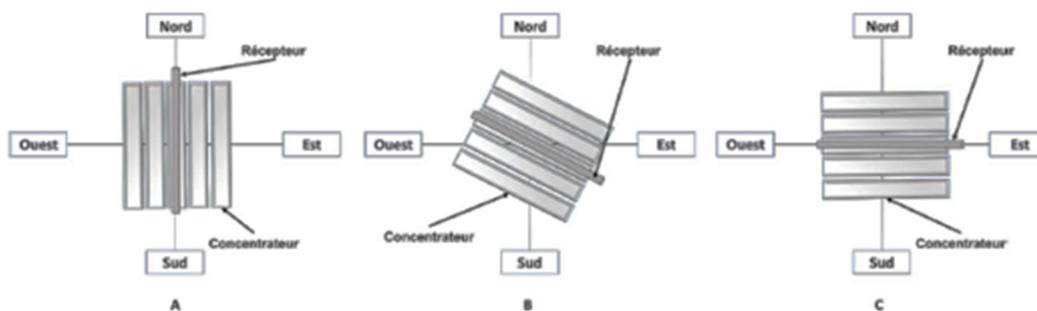
Figure 1.14 : Illustration des pertes par effet cosinus

La qualité des miroirs utilisés est également un facteur à prendre en compte. Plus la réflectivité spéculaire des miroirs est élevée, Au niveau du miroir, l'épaisseur de la couche de verre protégeant la couche réfléchissante est également un facteur de pertes optiques. Un verre épais augmente les pertes optiques par absorption et un verre trop fin augmente les risques de casse du miroir, En utilisant un puissant système de suivi de la lumière solaire, certaines pertes optiques peuvent être réduites. Le suivi du soleil du collecteur Fresnel linéaire se fait le long d'un seul axe. Selon la direction du collecteur, cela peut être quotidien ou saisonnier [3].



**Figure 1.15** : A- Illustration des pertes optiques par dé-focalisation ; B- Illustration des pertes optiques en fin de ligne

**4. Orientation du collecteur** : Le collecteur est le plus souvent horizontal et orienté suivant les directions nord-sud ou est-ouest (Figure 1.16).



**Figure 1.16** : orientation du collecteur suivant trois directions : A-nord-sud, B-intermédiaire et c-est-ouest

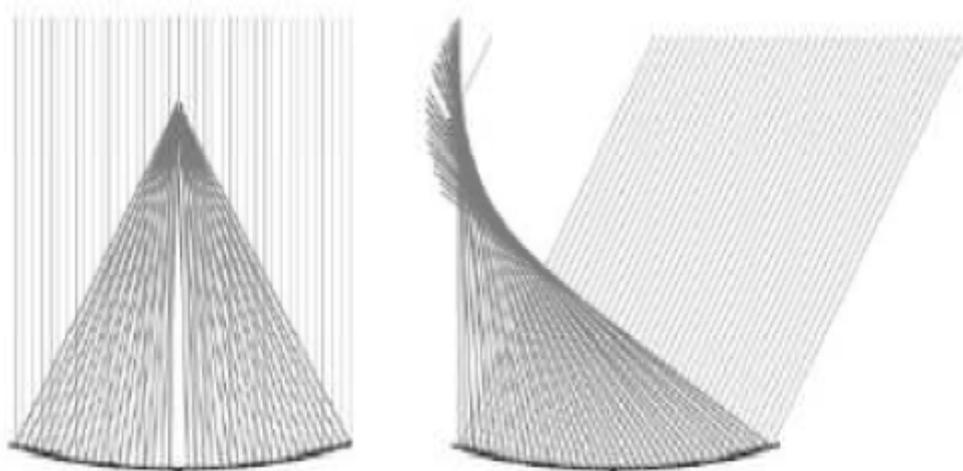
**4.1. Orientation est-ouest** : Un collecteur orienté dans la direction est-ouest est parallèle à la course du soleil. Cette orientation permet de réduire les pertes par effet cosinus, les pertes par blocage et par ombrage au cours de la journée. Dans une telle orientation, les pertes optiques par dé-focalisation sont des pertes saisonnières et les pertes de fin de ligne sont des pertes journalières.

**4.2. Orientation nord-sud** : L'orientation suivant la direction nord-sud, c'est-à-dire perpendiculairement à la course du soleil, est la plus répandue, car elle donne de meilleurs rendements. Les réflecteurs pivotent autour de l'axe nord-sud afin de faire toujours face au soleil et de réfléchir les rayons vers le récepteur. On la qualifie de suivi suivant l'azimut. Lorsque le collecteur est orienté suivant la direction nord-sud, les pertes par dé-focalisation sont journalières et les pertes en fin de lignes sont saisonnières.

**4.3. Les effets de l'orientation** : Le rendement des LFC dépend de leur orientation, tandis que les collecteurs orientés nord-sud ont des rendements plus élevés au cours de l'année (environ 5 à 8%) tandis que les collecteurs orientés est - ouest ont des heures de fonctionnement plus longues et donc des rendements plus élevés en hiver. Pour l'application dans l'industrie, les deux orientations présentent des avantages et l'orientation n'est donc pas un facteur décisif [4].

**4.4. Les effets optiques du concentrateur LFC :** Dans les concentrateurs LFC, les réflecteurs primaires sont légèrement courbés afin de focaliser le rayonnement sur l'absorbeur. Ainsi, un rayonnement parallèle à l'axe principal des réflecteurs provoque une seule ligne focale. Cependant, comme les miroirs ne sont pas normaux à la radiation entrante, les LFC souffrent toujours d'un astigmatisme, ce qui réduit l'efficacité. De plus, d'autres effets réduisent l'efficacité optique ( $\eta_{opt}$ ) :

- Pertes de cosinus dues à de faibles positions du soleil,
- Ombrage dû à l'absorbeur, à la structure ou au réflecteur secondaire,
- Occultation du rayonnement réfléchi à l'arrière des autres miroirs,
- Pertes d'extrémité de ligne lorsque la réflexion manque l'absorbeur dans l'axe longitudinal,
- Erreurs optiques dues au matériel, à la construction ou à la poursuite,
- Absorption de rayonnement dans le réflecteur primaire / secondaire ou la peau de l'absorbeur externe [4].



**Figure 1.17 :** L'astigmatisme dans les collecteurs linéaires de Fresnel

**5. Les modèles optiques du concentrateur linéaire de Fresnel :** Lors de la mise au point d'un nouveau produit, la phase de conception est cruciale. La conception peut nécessiter la réalisation de plusieurs prototypes avant la version définitive. La construction de nouveaux prototypes ou la modification de prototypes sont des opérations très coûteuses d'un point de vue financier, mais également en matière de temps de travail. La modélisation permet d'optimiser la conception. Elle réduit le temps de travail et est source d'énormes réductions financières. Nous allons nous intéresser à la modélisation du collecteur linéaire de type Fresnel. Nous présenterons un bref exposé sur les modèles optiques de collecteurs linéaires de type Fresnel existants. Les pertes dues aux propriétés des miroirs, les pertes par ombrage, les pertes par blocage, les pertes en fin de ligne, les pertes par dé-focalisation ont été présentés

précédemment. La modélisation optique du concentrateur permet de prendre en compte toutes ces pertes et de les quantifier. Il s'agit également d'un outil qui permet d'optimiser la conception du concentrateur. La méthode la plus utilisée pour modéliser le transfert radiatif dans les systèmes solaires à concentration est la méthode de lancer de rayons probabiliste utilisant la méthode de Monte-Carlo [7, 8]. La méthode de lancer de rayons permet de prendre en compte les géométries complexes et permet d'optimiser la conception du concentrateur ou tout simplement de déterminer le rendement optique d'un collecteur donné. Il existe plusieurs logiciels dédiés à la modélisation du collecteur par lancer de rayons. Nous pouvons citer :

- SolTrace [9], développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL). Il s'agit d'un logiciel gratuit ;
- Tonatiuh qui est libre et gratuit. Il est développé par Blanco et al ;
- Soltice [10] est un logiciel libre et gratuit. Il est développé par le laboratoire PROMES CNRS ;
- Opsol mis au point par Benyakhlef et al. [11].

Veynandt et al. [7] ont simulé le comportement optique du collecteur linéaire de type Fresnel qu'ils ont construit à Albi. Ils ont mis au point un algorithme qu'ils ont implémenté dans l'Environnement de Développement en STATistiques Radiatives (EDStar). EDStar est un environnement de développement mis au point par l'équipe de recherche StarWest. Qiu et al. [12] et Cheng et al. [13] ont modélisé le comportement optique de leur concentrateur sous Fortran. Leur approche se base sur la méthode de lancer de rayons. Tsekouras et al. [14] ont utilisé le logiciel de lancer de rayon Soltrace pour modéliser le comportement optique de leur concentrateur. Ils ont retenu pour la forme du soleil un angle de 2,63 mrad. L'erreur spéculaire des réflecteurs définie est de 2 mrad. L'erreur d'inclinaison des réflecteurs primaires est définie à 7 mrad. La distribution de toutes les erreurs est considérée comme gaussienne. L'indice de réfraction du verre est fixé à 1,5. Singh et al. [15] ont modélisé le comportement optique de leur concentrateur à l'aide du logiciel Tonatiuh.

#### Référence :

- [1] [http://www.labothap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales\\_solaires\\_SQ070925.pdf](http://www.labothap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales_solaires_SQ070925.pdf)
- [2] [https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v016\\_n1\\_texte\\_11.pd](https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v016_n1_texte_11.pd)
- [3] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02368068/document>
- [4] Downloads/Rapport\_P6\_2014\_41%20(2).pdf
- [5] Contribution à la modélisation et à l'optimisation des concentrateurs solaires motorisés appliqués aux systèmes thermo solaires
- [6] <http://eprints.univ-batna2.dz/1624/1/These%20Achour.pdf>

- [7] Veynandt F. Cogénération héliothermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel : modélisation de l'ensemble du procédé 2011. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001786/> (accessed September 30, 2014).
- [8] Garcia P, Ferriere A, Bezian J-J. Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review. *Sol Energy* 2008 ; 82:189–97. doi:10.1016/j.solener.2007.08.004.
- [9] Wendelin T, Dobos A, and Lewandowski A. SolTrace: a ray-tracing code for complex solar optical systems. *Contract* 2013; 303:275–3000.
- [10] SOLSTICE SOFTWARE. Solstice n.d. <https://www.labex-solstice.fr/solstice-software/> (accessed October 8, 2018).
- [11] Benyakhlef S, Al Mers A, Merroun O, Bouatem A, Boutammachte N, El Alj S, et al. Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators. *Renew Energy* 2016;89:463–74. doi:10.1016/j.renene.2015.12.018.
- [12] Qiu Y, He Y-L, Wu M, Zheng Z-J. A comprehensive model for optical and thermal characterization of a linear Fresnel solar reflector with a trapezoidal cavity receiver. *Renew Energy* 2016; 97:129–44. doi:10.1016/j.renene.2016.05.065.
- [13] Cheng Z-D, Zhao X-R, He Y-L, Qiu Y. A novel optical optimization model for linear Fresnel reflector concentrators. *Renew Energy* 2018; 129: 486–99. doi:10.1016/j.renene.2018.06.019.
- [14] Tsekouras P, Tzivanidis C, Antonopoulos K. Optical and thermal investigation of a linear Fresnel collector with trapezoidal cavity receiver. *Appl Therm Eng* 2018; 135:379–88. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.02.082.
- [15] Singh r. Modelling and performance analysis of linear fresnel collector for process heat generation for ice cream factory in konya. Phd thesis. Middle east technical university, 2017.

---

# **CHAPITRE 2 :**

**Mise en place et caractérisation du  
collecteur linéaire de Fresnel**

---

La modélisation est un outil puissant permettant de reproduire mathématiquement le fonctionnement d'objets et de systèmes. Le fonctionnement représente l'évolution des variables externes et des grandeurs physiques internes du système étudié sous différentes contraintes. A partir de la modélisation, on procède à des simulations numériques afin d'optimiser par exemple les dispositifs solaires en général. La conception peut nécessiter la réalisation de plusieurs prototypes avant la version définitive. La modélisation permet d'optimiser la conception afin de réduire le temps de travail et des réductions financières. Nous allons nous intéresser à la modélisation du collecteur linéaire de type Fresnel où la simulation numérique est couramment utilisée pour l'optimisation de ses derniers. De ce fait, nous allons tout d'abord décrire le modèle du collecteur linéaire de type Fresnel pour lequel on s'est inspiré puis nous abordons le principe utilisé pour approcher une modélisation simple en utilisant des modules et bibliothèques déjà prédéfinies sous le langage Python.

### I. Description du collecteur linéaire de Fresnel :

Dans la présente étude, nous proposons la description de la structuration d'un prototype de concentrateur linéaire de Fresnel, par la simulation. Le concentrateur de Fresnel sera composé de plusieurs modules identiques. Cette étude s'intéresse à la simulation d'un seul module. L'optique de Fresnel comprend des miroirs de 0,1 m de large sur 1,5 m de longueur. Le **tableau 2.1** récapitule les valeurs des paramètres de la géométrie. Chaque miroir est monté sur un axe de rotation dans sa longueur. Les miroirs sont disposés en parallèle, à 0,145 m de distance entre deux axes. Les miroirs sont plans. Ses données ont été inspirés de la littérature [1] pour rester dans le même ordre de grandeur des conceptions qui peuvent être réalisées.

Désignation du paramètre	Valeur	Notation
Intervalle entre deux miroirs	$\Delta w_m$	0,145 m
Longueur d'un miroir	$l_m$	1,5 m
Largeur d'un miroir	$w_m$	0,1 m
Longueur du récepteur	$l_r$	5 m
Hauteur du récepteur	$h_r$	1,8 m
Décalage du récepteur	$\Delta l_r$	0 m
Diamètre tube récepteur	$D_p$	0,038 m
Largeur du récepteur secondaire	$w_{sr}$	0,1 m
Épaisseur de la vitre	$d_g$	0,004 m
Diamètre de la vitre	$D_g$	0,05 m

**Tableau 2.1** : Paramètres de la géométrie

D'un autre côté, la taille de la tache focale est gérable sans concentration des miroirs, grâce à leur faible largeur. La réflectivité des miroirs est d'environ 90%. Le taux de couverture du sol par les miroirs est de 70%, ce qui mène à un champ de miroirs de 3 m de large. Le récepteur est

fixé initialement à 1,5 m de hauteur au-dessus du champ de miroirs. La surface absorbante du récepteur est sélective, avec 90% d'absorptivité et 15% d'émissivité.

## II. Modélisation du collecteur linéaire de Fresnel :

**1. Le modèle optique du concentrateur :** La modélisation du concentrateur optique et des flux radiatifs qu'il concentre permet d'estimer les flux radiatifs absorbés par le récepteur linéaire pour modélisation thermique, de faire une étude des flux concentrés pour déterminer des zones de fortes concentrations locales qui détériorent le récepteur et une étude paramétrique de la géométrie du concentrateur de Fresnel pour améliorer ses performances.

Zhu [2] a modélisé un capteur linéaire de Fresnel en utilisant une approche analytique. Toutefois, la complexité optique des capteurs solaires à concentration pousse les développeurs à utiliser des méthodes stochastiques basées sur des techniques de « lancer de rayons ». La complexité optique des capteurs linéaires de Fresnel réside dans :

- La modification des positions relatives des miroirs par rapport au récepteur en fonction de la position du Soleil,
- La géométrie complexe du réflecteur secondaire du récepteur,
- Les erreurs optiques (défaut de positions et d'état de surface des miroirs).

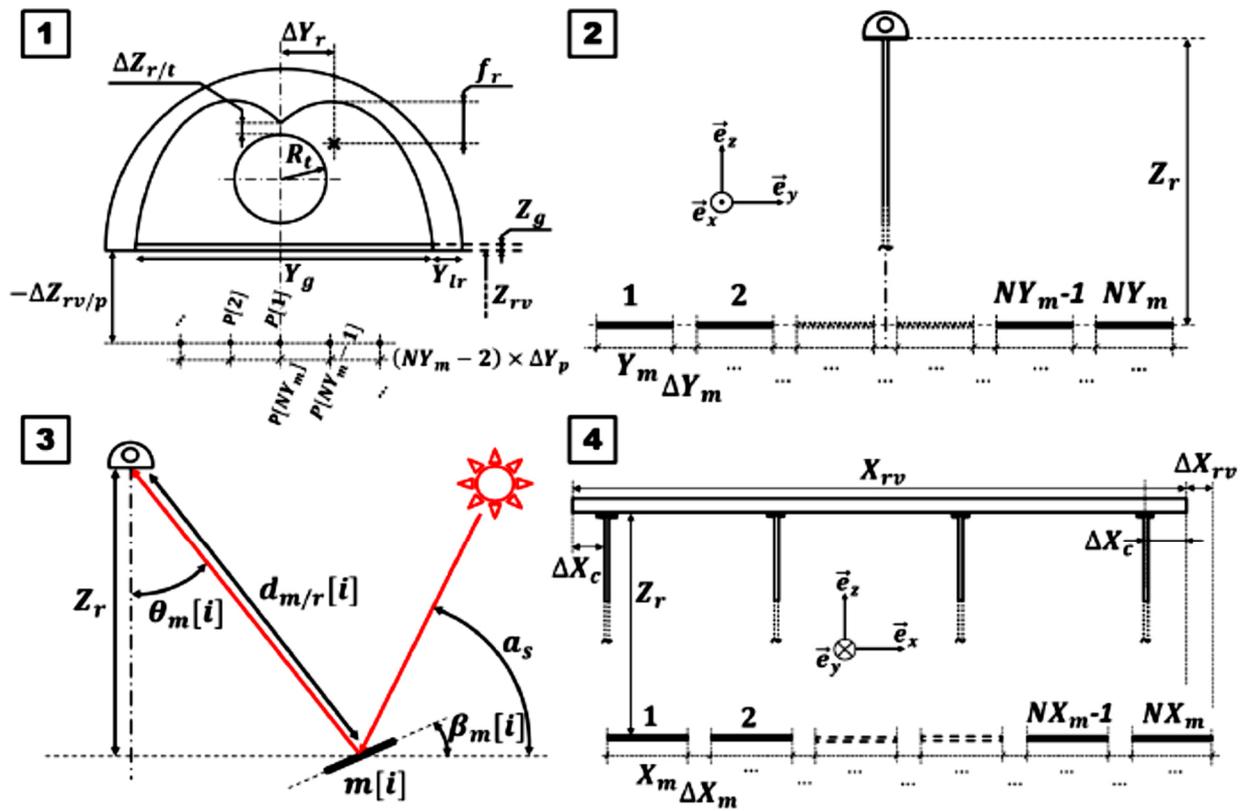
Il existe plusieurs outils utilisant ces méthodes stochastiques. Dans le cadre de ce Master, nous avons utilisé le modèle du capteur linéaire de Fresnel avec l'approche proposée par Veynandt François [1] qu'on résume dans le paragraphe ci-dessous.

**1.1. Description du capteur modélisé :** Le capteur linéaire de Fresnel se compose d'un champ de miroirs qui concentre le rayonnement solaire sur un récepteur fixe placé au-dessus de ce champ. Les miroirs possèdent la même longueur et la même largeur. Les miroirs extrêmes visent les points centraux et les miroirs centraux visent les points extrêmes. Cette configuration permet de limiter les fortes concentrations locales. De part et d'autre du vitrage, des réflecteurs latéraux limitent le flux absorbé par l'isolant pour ne pas le détériorer. Le récepteur est supporté par plusieurs poteaux régulièrement espacés, équipés de réflecteurs transversaux pour protéger les points d'appui du récepteur sur ces poteaux. Les poteaux extrêmes sont décalés par rapport aux extrémités du récepteur.

Les éléments du capteur modélisé sont positionnés par rapport à une base orthogonale  $\mathcal{B} = (\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ .  $\vec{e}_x$  est dirigé selon l'axe Nord-Sud,  $\vec{e}_y$  est dirigé selon l'axe est-Ouest et  $\vec{e}_z$  est dirigé vers les altitudes positives (**Figure 2.1**). Dans la direction est-Ouest ( $\vec{e}_y$ ) le nombre de miroirs, leur dimension le long de cette direction et leur espacement sont respectivement notés  $NY_m$ ,  $Y_m$  et  $\Delta Y_m$ . Dans la direction Nord- Sud ( $\vec{e}_x$ ) ces grandeurs sont notées de façon analogue.

La hauteur du récepteur et sa longueur sont notées respectivement  $Z_r$  et  $X_r$ . Cette hauteur est la distance entre la face extérieure du vitrage du récepteur et le plan contenant les axes de rotation des miroirs. L'espacement régulier entre les points visés par les miroirs est notée  $\Delta Y_p$ . L'altitude de ces points est notée  $\Delta Z_{r/p}$ . Elle est définie par rapport à la face extérieure du vitrage. Si des miroirs cylindro-paraboliques sont utilisés, alors la distance focale de chaque miroir correspond à la distance entre le centre du miroir et le point qui vise. Si des miroirs cylindriques sont utilisés, alors d'après Facão and Oliveira le rayon de l' $i$ ème miroir vaut

$$R_m(i) = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot d_{m/r}}{\sqrt{1 + \frac{z}{d_{m/r}(i)}}} \quad (2.1)$$



**Figure 2.1** : Paramètres géométriques du capteur : 1/ coupe transversale du récepteur ; 2/ vu du capteur dans direction Nord-Sud ; 3/ position d'un miroir par rapport au récepteur ; 4/ vu du capteur dans la direction est-Ouest.

L'angle de rotation des miroirs noté  $\beta_m$  dépend de la position du centre du miroir par rapport au récepteur et de la position du Soleil et pour la  $i$ ème rotation du miroir on peut écrire :

$$\beta_m(i) = \frac{\alpha_s + \theta_m(i)}{2} - \frac{\pi}{4} \quad (2.2)$$

Où  $\alpha_s$  est l'élévation apparente du Soleil dans la direction Nord-Sud, tel que

$$\tan(\alpha_s) - \frac{\pi}{2} = \frac{\sin(\gamma_s)}{\tan(\alpha_s)}. \quad (2.3)$$

Le rayon du tube absorbeur est noté  $R_t$ . La distance qui le sépare du *CPC* est notée  $Z_{r/t}$ . La distance focale des paraboles du *CPC* et leur décalage par rapport au centre du tube sont respectivement notés  $f_r$  et  $\Delta Y_r$ . La largeur du vitrage est notée  $Y_g$ .

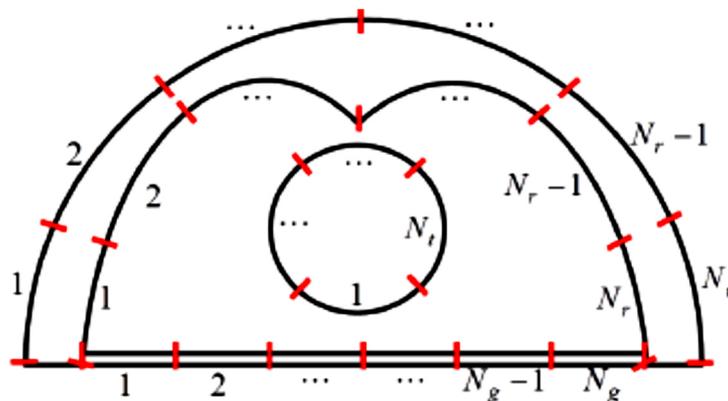
➤ **Propriétés optiques** : Les coefficients de réflexion et d'absorption optique retenue pour les calculs de simulation sont résumés dans le **Tableau 2.2 [1]** :

Eléments du capteur	Réfectivité $\rho$ (%)	Absorptivité $\alpha$ (%)
Miroirs	0,95	0,05
Réflecteurs secondaires	0,9	0,1
Réflecteurs transversaux	0,9	0,1
Réflecteurs latéraux	0,9	0,1
Vitrage	0,05	0,1
Tube absorbeur	0,08	0,92
Peinture de poteaux et de l'arrière du récepteur	0,7	0,3

**Tableau 2.2** : Coefficients optiques [1]

Pour le vitrage, les coefficients optiques correspondent à une incidence normale et pour des angles d'incidence différents, on utilise les formules de Snell-Descartes et de Fresnel correspondant à la traversée, par un rayon, d'une interface séparant deux milieux d'indice optique différent.

Dans la partie simulation, les codes de calcul permettent de calculer les cartes de flux absorbées par le tube absorbeur, le réflecteur secondaire, le vitrage et l'arrière du récepteur. Les éléments du récepteur sont subdivisés régulièrement le long de ces dimensions. Le nombre de pixels des cartes de flux le long de la dimension longitudinale est défini par le paramètre  $N_s$ . Le nombre de pixels, le long de la dimension transversale du tube, du réflecteur secondaire et vitrage est respectivement défini par les paramètres  $N_t$ ,  $N_r$  et  $N_g$ . Le nombre de pixels le long de la dimension transversale de l'arrière du récepteur linéaire est le même que celui de réflecteur secondaire (**Figure 2.2**). Chaque pixel d'une même carte de flux possède la même aire.



**Figure 2.2** : Discrétisation transversale du récepteur

La position du Soleil est définie directement par un couple d'angles solaires, l'élévation et l'azimut, ou la déclinaison et l'angle horaire. L'intensité du rayonnement solaire direct et sa

répartition spatiale peuvent être simulées par le modèle *PillBox* où la répartition du rayonnement est uniforme sur tout le disque solaire dont l'angle solide apparent est fixé au préalable. L'algorithme de calcul des facteurs de forme utilisé est présenté de façon générale par Delatorre J. G. [3] et François Veynandt [1] l'a adapté pour le calcul des facteurs de forme entre le tube, le réflecteur secondaire, et le vitrage. Cet algorithme a été adapté afin de pouvoir calculer les facteurs de forme entre les éléments discrétisés du récepteur en utilisant une méthode d'optimisation stochastique qui permet de vérifier le respect de certaines contraintes du problème traité. Le principe général de la méthode utilisée dans cette étude est la suivante :

**Étape 1 :** Une ou plusieurs fonctions-objectifs sont définies en fonction des sorties du modèle et éventuellement des paramètres de celui-ci.

**Étape 2 :** Chacun des  $p$  paramètres étudiés est associé à un domaine plausible de variation.

**Étape 3 :** Un nombre  $n$  de jeux de paramètres est échantillonné aléatoirement et selon une distribution uniforme dans les domaines définis à l'étape 2. Pour cela, un générateur de nombres aléatoire basé sur la méthode Latin Hypercube [4] a été utilisé.

**Étape 4 :** Chacun de ces jeux de paramètres est évalué afin de vérifier s'ils respectent les contraintes du problème. Les jeux qui ne respectent pas ces contraintes sont éliminés et d'autres jeux sont échantillonnés et vérifiés jusqu'à obtenir les  $n$  jeux voulus.

**Étape 5 :** Après avoir effectué les simulations correspondant à ces  $n$  jeux de paramètres, les jeux qui ont conduit aux meilleurs résultats, conformément à la fonction-objectif définie à l'étape 1, sont sélectionnés. Le nombre de jeux sélectionnés est noté  $m$ . Ces  $m$  jeux de  $p$  paramètres sont les meilleurs candidats et ils sont regroupés sous la forme d'une matrice  $A \in \mathcal{M}_m(\mathbb{R})$  :

$$A = \begin{pmatrix} X_1(1) & \cdots & X_p(1) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ X_1(m) & \cdots & X_p(m) \end{pmatrix}$$

**Étape 6 :** Un nombre  $n'$  de nouveaux jeux de paramètres sont générés à partir des meilleurs candidats qui ont été déterminés précédemment (matrice  $A$ ). Pour cela, la méthode décrite par Steele [5] et Fang, Gertner, and Anderson [6] a été utilisée.

**2. Le choix du langage de programmation :** Dans le monde du calcul scientifique, le nombre de calculs et la difficulté de ceux-ci (linéarisation, résolution...) demandent un langage compilé qui ne ralentira pas l'exécution du programme à cause de la phase d'interprétation du code. En effet, un langage compilé est plus rapide qu'un langage interprété (la phase conversion langage humain vers langage machine, binaire, n'est réalisée qu'une seule fois). L'inconvénient de cette solution est qu'à chaque modification il faut recompiler l'ensemble du code. Devoir recompiler

pour l'ajout de quelques tracés de courbes, d'évaluation ou de traitement (comparaison, calcul de normes, vérification du domaine) de variables peut vite devenir pénible. Bien sûr avec la plupart des langages, il est possible de tout faire grâce aux nombreuses bibliothèques existantes, mais au regard de la facilité offerte par un langage interprété nous sommes prêts à perdre un peu de performance. La solution que nous offrons est de sortir certaines couches de ce processus et de fait d'utiliser un langage interprété (qu'il reste à choisir). Quand on compare un langage interprété à un langage compilé, on oppose l'efficacité au confort. Notre option offrira un confort suffisant et une efficacité certaine. Nous avons choisi d'utiliser un langage interprété : PYTHON. Le choix de ce langage s'est fait sur plusieurs critères :

- C'est un langage très prisé par la communauté des développeurs/codeurs (anciens et nouveaux),
- Une documentation riche et bien fournie,
- De nombreux outils déjà développés pour le calcul scientifique,
- La possibilité de visualiser dans des graphiques 2D ou 3D et de faire de l'orienté objet,
- Un effort d'apprentissage faible par rapport à beaucoup d'autre langage.

En résumé, nous avons choisi d'utiliser les langages de programmation Python [7], pour sa flexibilité, et son efficacité éprouvée. Python offrira à nous utilisateurs une interface interactive et la partie numérique du code de calcul. En choisissant de coder en Python, nous bénéficions du meilleur de ces deux styles de langage de programmation. En effet, cette approche à l'avantage :

- D'une part d'affranchir l'utilisateur de l'étape de compilation évitant ainsi des résultats faussés dus à l'oubli de compiler après modification,
- Et d'autre part d'avoir le cœur du programme (là où se font les opérations les plus volumineuses et donc coûteuses en temps) compilé une seule et unique fois.

Cette stratégie est très avantageuse car on ne devra gérer que l'interface en Python ; Python étant un des langages les plus faciles à appréhender même pour un néophyte. De plus, nous avons la possibilité d'utiliser plusieurs bibliothèques dédiées à la réalisation, le fonctionnement, la mise en place et la caractérisation optique d'un concentrateur linéaire de Fresnel sous le langage Python tels que SolTrace, PHIDGETS ou STEPPER et tant d'autres.

Les grandeurs calculées par l'algorithme de Monte Carlo permettent :

- d'évaluer les performances globales du concentrateur, grâce à la puissance totale absorbée sur le tube  $\Phi$  et la puissance perdue par ombrage, blocage ou débordement,

- de comprendre le chemin suivi par les rayons, grâce à la puissance collectée par l'intermédiaire du réflecteur secondaire (après au moins une réflexion sur celui-ci) et la puissance collectée après un certain nombre de réflexions : 1, 2, 3, 4, 5 ou plus...
- de visualiser la distribution du flux absorbé sur le tube récepteur : quelques milliers de variables caractérisent la carte de flux radiatif collecté sur l'élément absorbeur. Pour obtenir une précision satisfaisante, on discrétise la surface du tube en 36 segments angulaires et 50 segments dans la longueur. La carte de flux a ainsi 1 800 points. C'est un bon compromis entre précision de la carte et temps de calcul nécessaire à la simulation.

L'utilisation de la bibliothèque (ou module) SOLTRACE qui est devenu un logiciel libre développé par le laboratoire national d'énergie renouvelable allemand NREL depuis 2003 [8, 9]. Le logiciel simule le parcours d'un nombre prédéfini de rayons entre le soleil et un système défini en respectant une distribution énergétique correspondant à la forme du soleil. Il prend en compte toutes les interactions dans le système. La modélisation du collecteur sous SOLTRACE et les différentes simulations paramétriques permettent de prédire son comportement optique, de définir les éléments et d'améliorer son rendement global. SOLTRACE utilise un algorithme de calcul appliquant la méthode de « Rayons lancés » par laquelle chaque rayon interagit optiquement avec le système. Le principe de cette démarche est de choisir de manière aléatoire une série de rayons issus d'une surface 1 et de déterminer la quantité de rayons de cette série qui arrive sur une surface 2. L'éclairement d'un élément de surface est ainsi déterminé grâce à la proportion de rayons impactant la surface 2 par rapport au nombre total de rayons lancés depuis la surface 1.

Avec SolTrace, le système optique est présenté sous forme de rangées (stages) dans le système de coordonnées globales. Une rangée (stage) c'est la une section de la géométrie optique qui, une fois que le rayon sort du disque solaire, ne sera pas réintégrée par le rayon sur le reste de son chemin à travers le système. La géométrie globale du système est consistée de plusieurs étapes. L'intérêt de cette conceptualisation préconise un suivi efficace avec économie du temps de traitement et de permettre une représentation modulaire du système étudié. L'un des avantages de cette démarche est de sauvegarder et d'utiliser les paramètres dans d'autres géométries du système sans avoir à recalculer les positions et les orientations des éléments.

#### **Référence :**

- [1] Veynandt, François. 2011. "Cogénération Héliothermodynamique Avec Concentrateur Linéaire de Fresnel : Modélisation de L ' Ensemble Du Procédé Rapport de Thèse de Doctorat."

- [2] Zhu, G., 2013. Development of an analytical optical method for linear Fresnel collectors. *Sol. Energy* 94, 240–252. doi:10.1016/j.solener.2013.05.003
- [3] Delatorre, J., G. Baud, J.J. Bézian, S. Blanco, C. Caliot, J.F. Cornet, C. Coustet, et al. 2014. “Monte Carlo Advances and Concentrated Solar Applications.” *Solar Energy* 103 (May): 653–681. doi:10.1016/j.solener.2013.02.035.
- [4] Helton, J. C., and F. J. Davis. 2003. “Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems.” *Reliability Engineering and System Safety*. doi:10.1016/S0951-8320(03)00058-9
- [5] Steele, J. Michael. 1987. “Non-Uniform Random Variate Generation (Luc Devroye).” *SIAM Review*. doi:10.1137/1029148
- [6] Fang, Shoufan, George Z. Gertner, and Alan A. Anderson. 2004. “Estimation of Sensitivity Coefficients of Nonlinear Model Input Parameters Which Have a Multinormal Distribution.” *Computer Physics Communications* 157: 9–16. doi:10.1016/S0010-4655(03)00488-0
- [7] Python Programming Language – Official Website.
- [8] Wendelin, T. (2003). "SolTRACE: A New Optical Modeling Tool for Concentrating Solar Optics." Proceedings of the ISEC 2003: International Solar Energy Conference, 15-18 March 2003, Kohala Coast, Hawaii. New York: American Society of Mechanical Engineers, pp. 253-260; NREL Report No. CP-550-32866.
- [9] Wendelin, T., Wagner, M.J. (2018). "SolTrace Open-Source Software Project: [github.com/NREL/SolTrace](https://github.com/NREL/SolTrace)". National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado.

---

# **CHAPITRE 3 :**

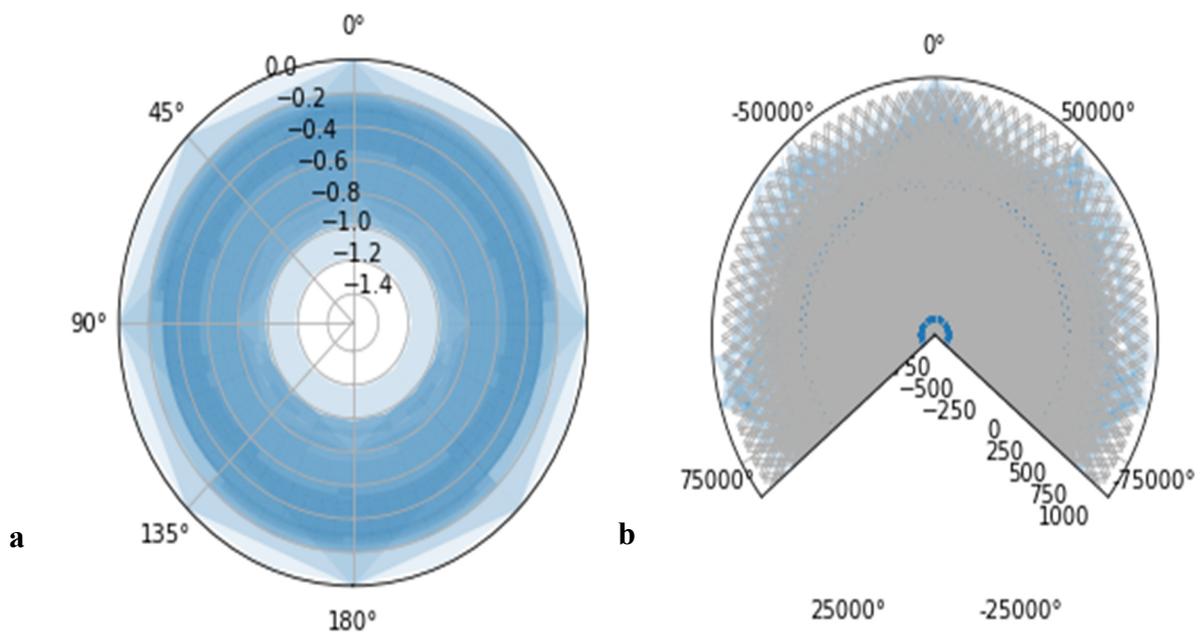
## **Résultats et interprétations**

---

La modélisation du concentrateur linéaire de Fresnel et des flux radiatifs qu'il concentre à plusieurs objectifs : Estimer les flux radiatifs absorbés par le récepteur linéaire afin de modéliser son comportement thermique, l'étude de ces flux concentrés afin de déterminer les éventuelles zones de fortes concentrations locales et l'étude des paramètres géométriques du capteur afin d'améliorer les performances de ce dernier. La complexité optique des capteurs solaires à concentration ramène les développeurs à utiliser des méthodes stochastiques basées sur des techniques de lancer de rayons.

Dans le cadre de ce Master, nous utilisons ces techniques de lancer de rayons qui sont préprogrammées dans SOLTRACE sous python afin de faire une simple simulation sur un capteur linéaire de Fresnel et nous présenterons les quelques résultats obtenus avec leur interprétation.

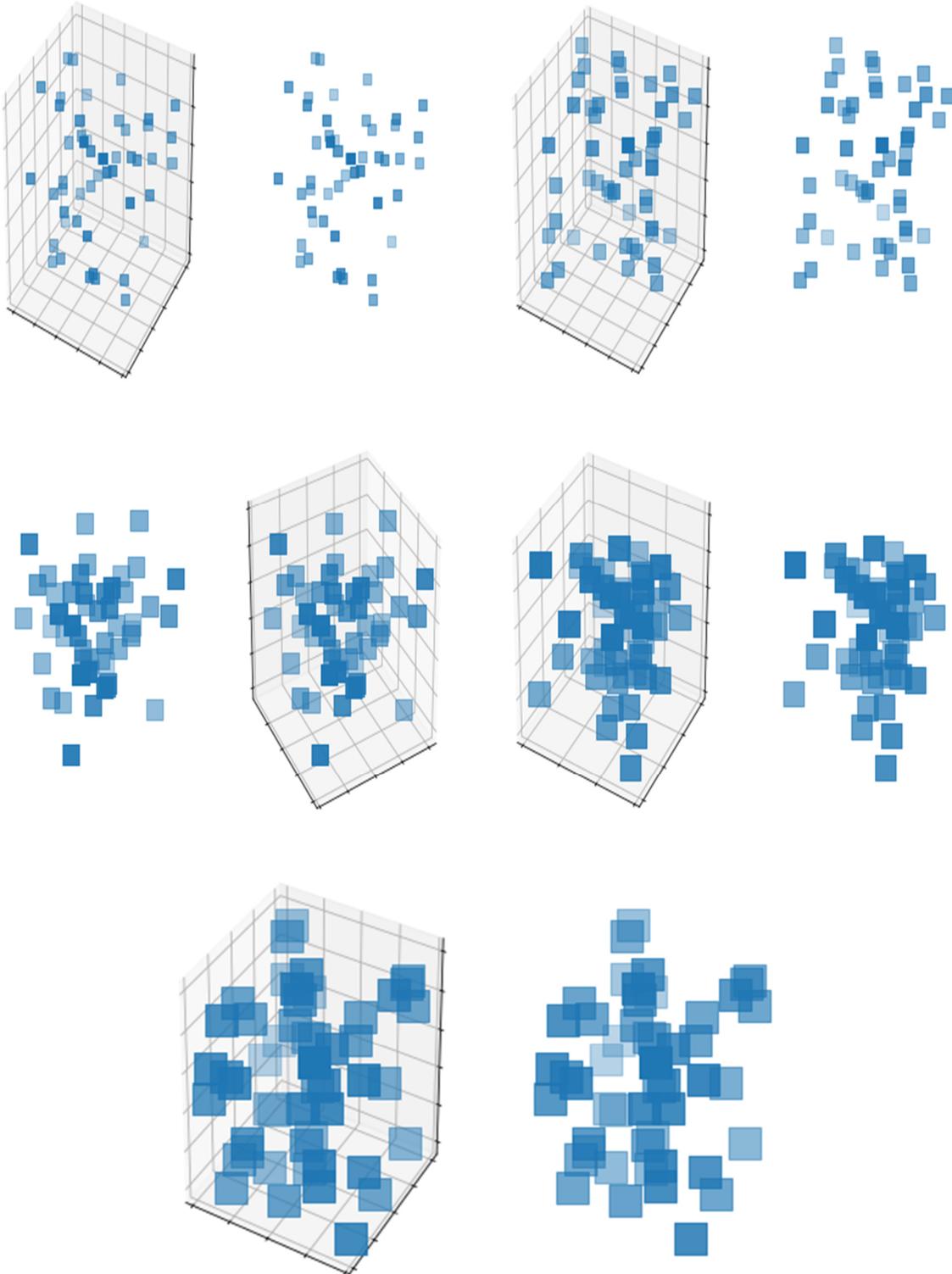
Dans un premier temps, nous allons procéder au maillage de notre récepteur qui nous permettra par la suite de déterminer les intensités à différentes concentrations solaires. Cette discrétisation est représentée sur la **Figure 3.1**.



**Figure 3.1** : Maillage du récepteur : a- Maillage polaire unitaire, b- Maillage global du récepteur

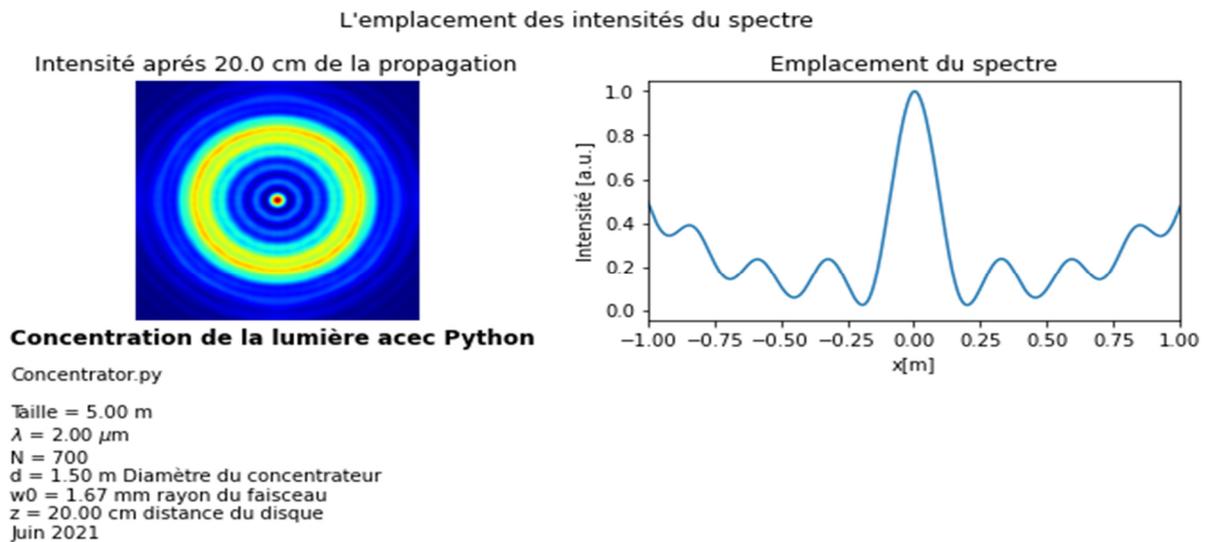
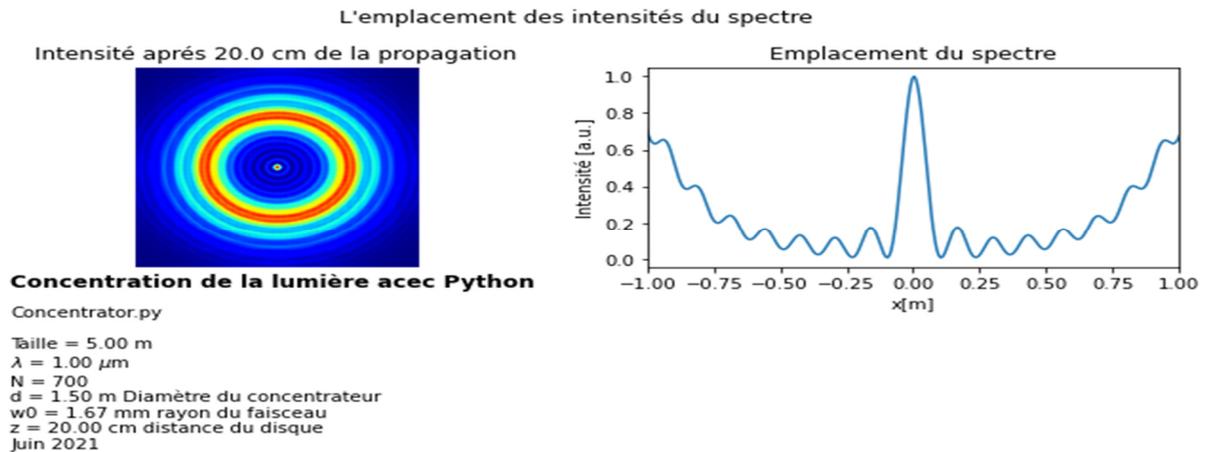
La **Figure 3.2** représente les valeurs prises par la technique du lancer de rayons en fonction des paramètres à optimiser vus au chapitre précédent. À chaque itération, on constate la diminution de ces paramètres autour de leurs valeurs optimales. C'est la position du maximum de l'enveloppe supérieure qui détermine la valeur optimum. À l'aide de ces graphiques, la largeur des miroirs, leurs espacements transversaux et la largeur du vitrage ont été respectivement fixés à 50 cm, 25 cm et 15 cm. On remarque que les dimensions des récepteurs doivent permettre au

tube d'absorber le maximum de flux mais il faut surveiller la répartition angulaire de sa densité pour qu'il reste le plus homogène possible afin d'éviter des points de surchauffe pouvant dégrader le fluide caloporteur.



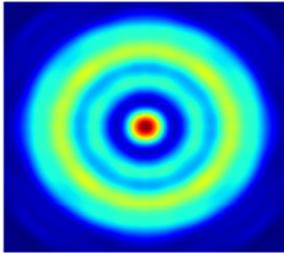
**Figure 3.2 :** Densité du flux absorbé par le tube en fonction des paramètres à optimiser

La **Figure 3.3** présente la variation de l'intensité du spectre au niveau du concentrateur de Fresnel en fonction de la longueur d'onde émise par la lumière. On constate que plus la longueur d'onde augmente l'intensité spectrale reste constante mais sa variation transversale en fonction d'un déplacement  $x$  donne moins de franges c'est-à-dire le nombre d'oscillations lumineuses diminue. Ceci s'explique par la variabilité des propriétés optiques des matériaux constituant le concentrateur de Fresnel.



L'emplacement des intensités du spectre

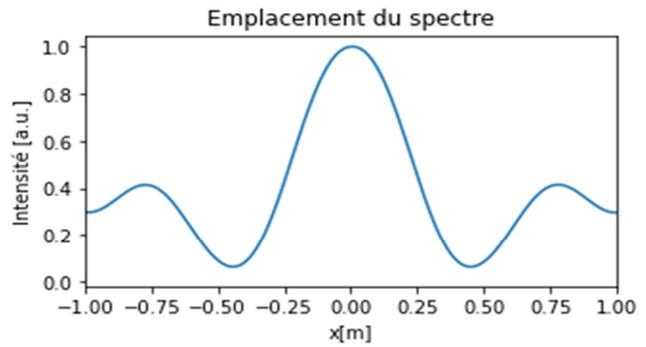
Intensité après 20.0 cm de la propagation



**Concentration de la lumière avec Python**

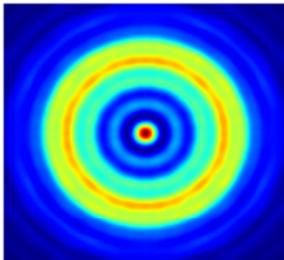
Concentrator.py

Taille = 5.00 m  
 $\lambda = 5.00 \mu\text{m}$   
 $N = 700$   
 $d = 1.50 \text{ m}$  Diamètre du concentrateur  
 $w_0 = 1.67 \text{ mm}$  rayon du faisceau  
 $z = 20.00 \text{ cm}$  distance du disque  
 Juin 2021



L'emplacement des intensités du spectre

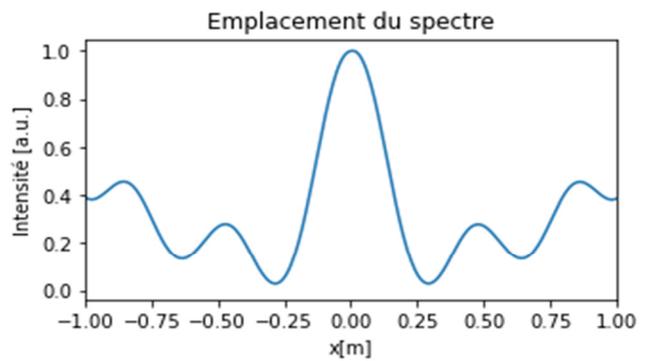
Intensité après 20.0 cm de la propagation



**Concentration de la lumière avec Python**

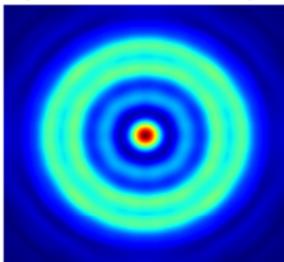
Concentrator.py

Taille = 5.00 m  
 $\lambda = 3.00 \mu\text{m}$   
 $N = 700$   
 $d = 1.50 \text{ m}$  Diamètre du concentrateur  
 $w_0 = 1.67 \text{ mm}$  rayon du faisceau  
 $z = 20.00 \text{ cm}$  distance du disque  
 Juin 2021



L'emplacement des intensités du spectre

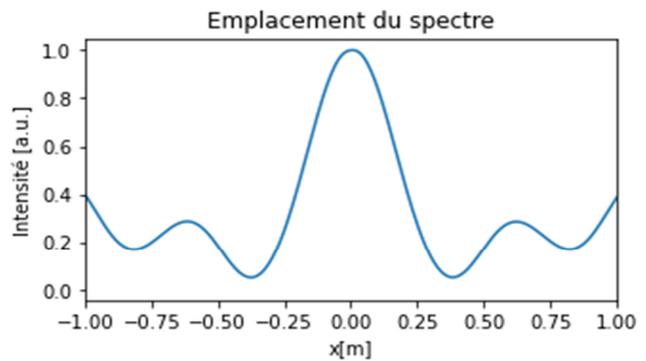
Intensité après 20.0 cm de la propagation



**Concentration de la lumière avec Python**

Concentrator.py

Taille = 5.00 m  
 $\lambda = 4.00 \mu\text{m}$   
 $N = 700$   
 $d = 1.50 \text{ m}$  Diamètre du concentrateur  
 $w_0 = 1.67 \text{ mm}$  rayon du faisceau  
 $z = 20.00 \text{ cm}$  distance du disque  
 Juin 2021

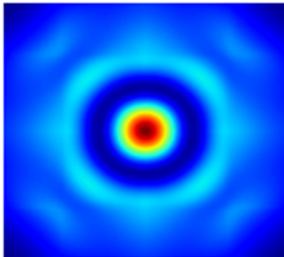


**Figure 3.3 :** Variation de l'intensité du spectre en fonction de la longueur d'onde

La **Figure 3.4** présente la variation de l'intensité du spectre au niveau du concentrateur de Fresnel en fonction de la taille du concentrateur lui-même. On constate que plus la longueur du concentrateur augmente plus l'intensité spectrale reste constante mais sa variation transversale en fonction d'un déplacement  $x$  donne moins de franges c'est-à-dire le nombre d'oscillations lumineuses diminue. Ceci s'explique par la variabilité des propriétés optiques des matériaux constituant le concentrateur de Fresnel. De plus l'image focale est plus étalée sachant qu'elle peut varier en fonction des saisons de l'année. C'est pour ça, il est plus judicieux de faire une étude paramétrique de l'optimisation de la géométrie du concentrateur et ceci par rapport à ses différents composants.

#### L'emplacement des intensités du spectre

Intensité après 20.0 cm de la propagation



**Concentration de la lumière avec Python**

Concentrator.py

Taille = 3.00 m

$\lambda = 5.00 \mu\text{m}$

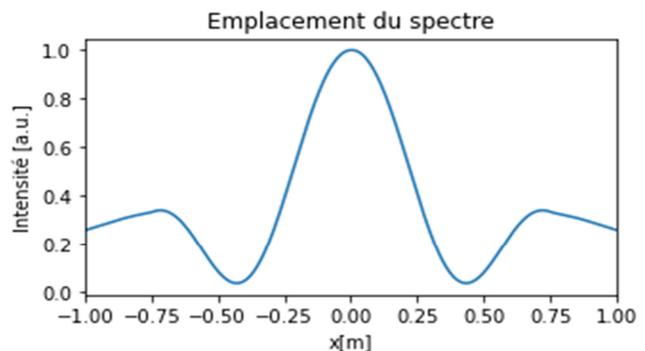
$N = 700$

$d = 1.50$  m Diamètre du concentrateur

$w_0 = 1.00$  mm rayon du faisceau

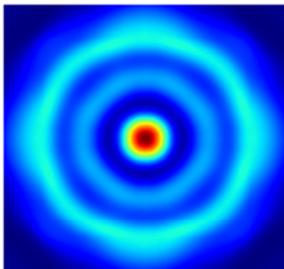
$z = 20.00$  cm distance du disque

Juin 2021



#### L'emplacement des intensités du spectre

Intensité après 20.0 cm de la propagation



**Concentration de la lumière avec Python**

Concentrator.py

Taille = 4.00 m

$\lambda = 5.00 \mu\text{m}$

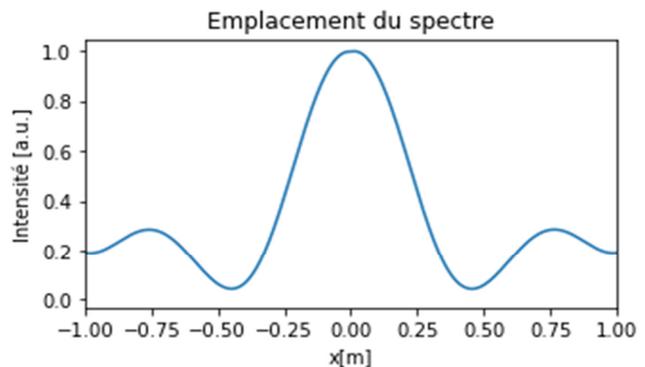
$N = 700$

$d = 1.50$  m Diamètre du concentrateur

$w_0 = 1.33$  mm rayon du faisceau

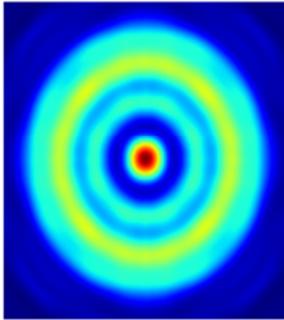
$z = 20.00$  cm distance du disque

Juin 2021



## L'emplacement des intensités du spectre

Intensité après 20.0 cm de la propagation

**Concentration de la lumière avec Python**

Concentrator.py

Taille = 5.00 m

 $\lambda = 5.00 \mu\text{m}$ 

N = 700

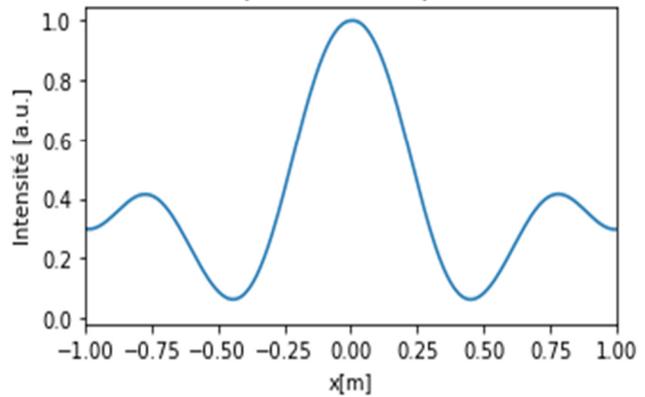
d = 1.50 m Diamètre du concentrateur

w0 = 1.67 mm rayon du faisceau

z = 20.00 cm distance du disque

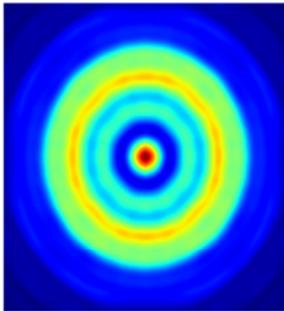
Juin 2021

Emplacement du spectre



## L'emplacement des intensités du spectre

Intensité après 20.0 cm de la propagation

**Concentration de la lumière avec Python**

Concentrator.py

Taille = 6.00 m

 $\lambda = 5.00 \mu\text{m}$ 

N = 700

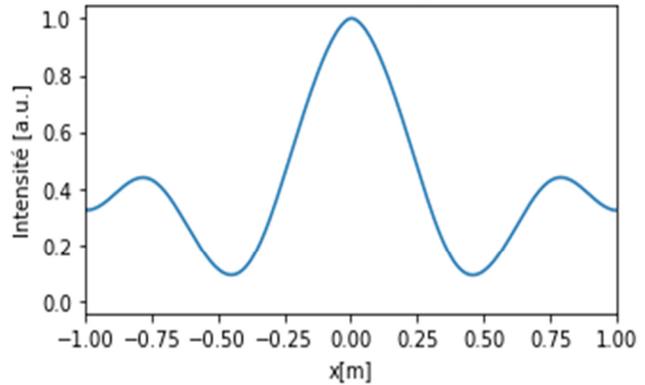
d = 1.50 m Diamètre du concentrateur

w0 = 2.00 mm rayon du faisceau

z = 20.00 cm distance du disque

Juin 2021

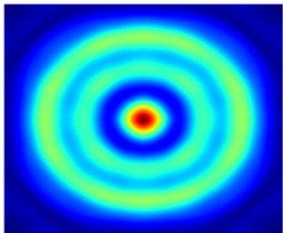
Emplacement du spectre

**Figure 3.4 :** Variation de l'intensité du spectre en fonction de la taille du concentrateur

La **Figure 3.5** présente la variation de l'intensité du spectre en fonction de la distance entre les miroirs. On constate que les miroirs sont suffisamment éloignés les uns des autres par rapport à la hauteur de récepteur choisie. De plus, plus la distanciation des miroirs diminue, on constate que le point focal devient intense. Ceci s'explique par le fait que les rayons sont perdus par réflexion.

## L'emplacement des intensités du spectre

Intensité après 25.0 cm de la propagation

**Concentration de la lumière avec Python**

Concentrator.py

Taille = 5.00 m

 $\lambda = 5.00 \mu\text{m}$ 

N = 700

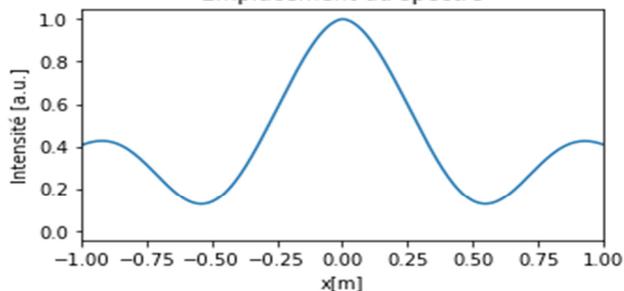
d = 1.50 m Diamètre du concentrateur

w0 = 1.67 mm rayon du faisceau

z = 25.00 cm distance du disque

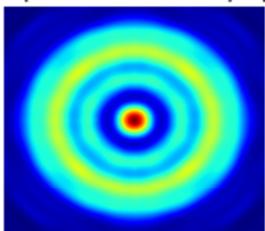
Juin 2021

Emplacement du spectre



## L'emplacement des intensités du spectre

Intensité après 20.0 cm de la propagation

**Concentration de la lumière avec Python**

Concentrator.py

Taille = 5.00 m

 $\lambda = 5.00 \mu\text{m}$ 

N = 700

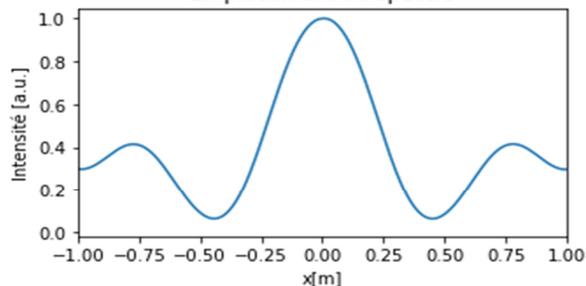
d = 1.50 m Diamètre du concentrateur

w0 = 1.67 mm rayon du faisceau

z = 20.00 cm distance du disque

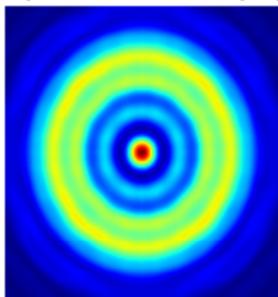
Juin 2021

Emplacement du spectre



## L'emplacement des intensités du spectre

Intensité après 15.0 cm de la propagation

**Concentration de la lumière avec Python**

Concentrator.py

Taille = 5.00 m

 $\lambda = 5.00 \mu\text{m}$ 

N = 700

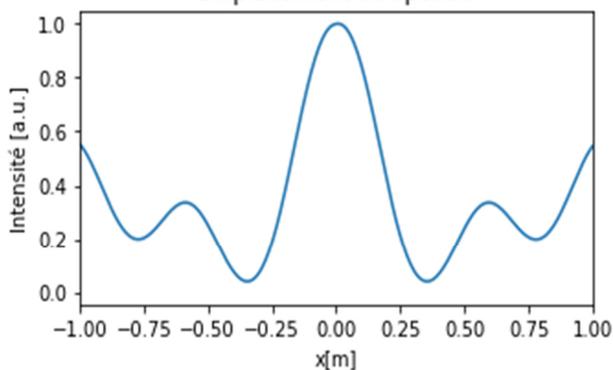
d = 1.50 m Diamètre du concentrateur

w0 = 1.67 mm rayon du faisceau

z = 15.00 cm distance du disque

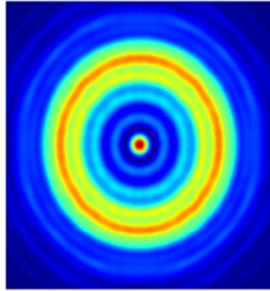
Juin 2021

Emplacement du spectre



L'emplacement des intensités du spectre

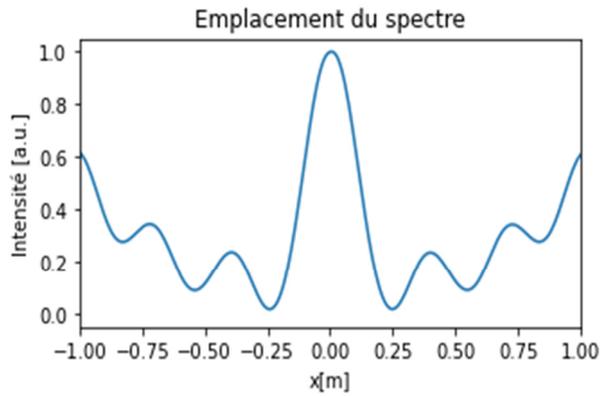
Intensité après 10.0 cm de la propagation



**Concentration de la lumière avec Python**

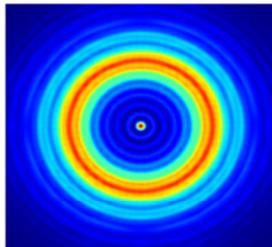
Concentrator.py

Taille = 5.00 m  
 $\lambda = 5.00 \mu\text{m}$   
 $N = 700$   
 $d = 1.50 \text{ m}$  Diamètre du concentrateur  
 $w_0 = 1.67 \text{ mm}$  rayon du faisceau  
 $z = 10.00 \text{ cm}$  distance du disque  
 Juin 2021



L'emplacement des intensités du spectre

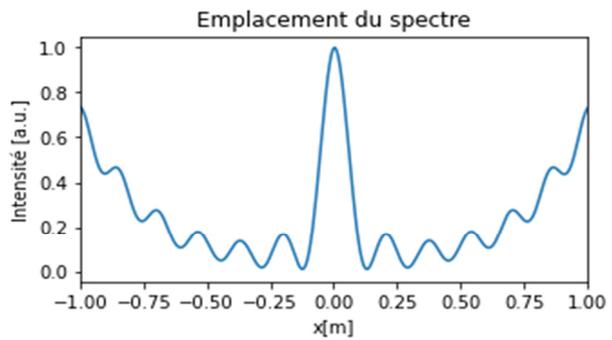
Intensité après 5.0 cm de la propagation



**Concentration de la lumière avec Python**

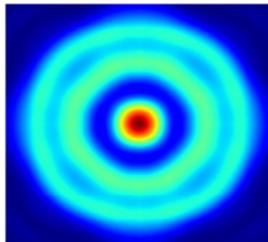
Concentrator.py

Taille = 5.00 m  
 $\lambda = 5.00 \mu\text{m}$   
 $N = 700$   
 $d = 1.50 \text{ m}$  Diamètre du concentrateur  
 $w_0 = 1.67 \text{ mm}$  rayon du faisceau  
 $z = 5.00 \text{ cm}$  distance du disque  
 Juin 2021



L'emplacement des intensités du spectre

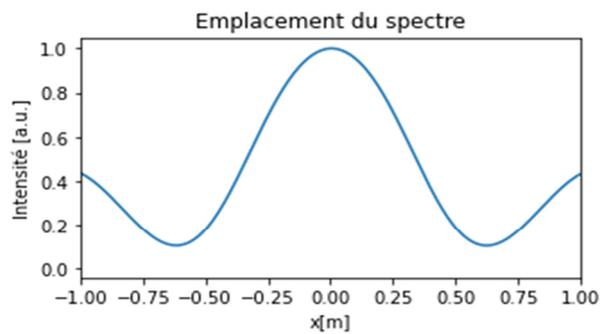
Intensité après 30.0 cm de la propagation



**Concentration de la lumière avec Python**

Concentrator.py

Taille = 5.00 m  
 $\lambda = 5.00 \mu\text{m}$   
 $N = 700$   
 $d = 1.50 \text{ m}$  Diamètre du concentrateur  
 $w_0 = 1.67 \text{ mm}$  rayon du faisceau  
 $z = 30.00 \text{ cm}$  distance du disque  
 Juin 2021



**Figure 3.5 :** Variation de l'intensité du spectre en fonction de la distance entre les miroirs

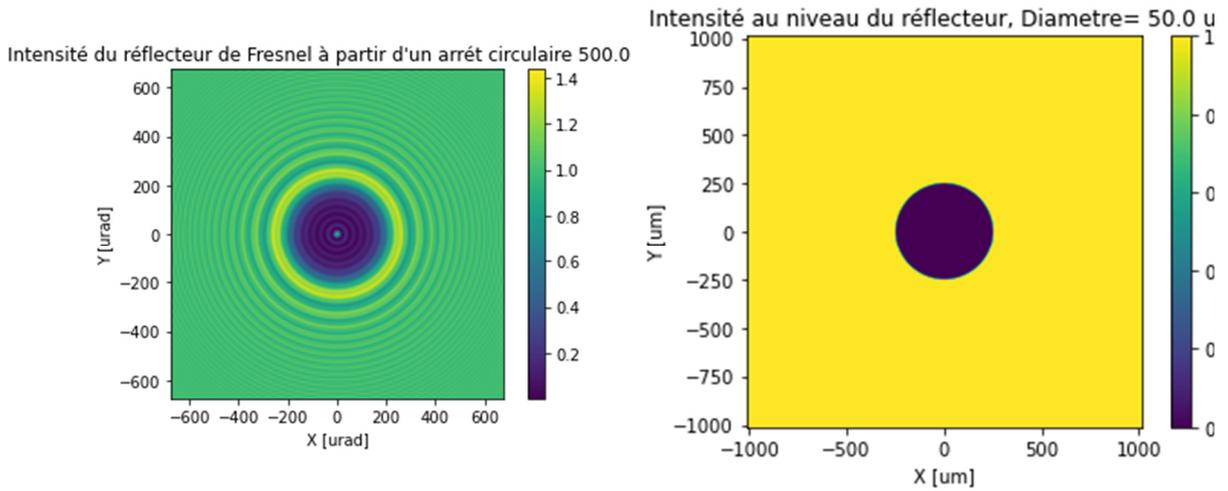
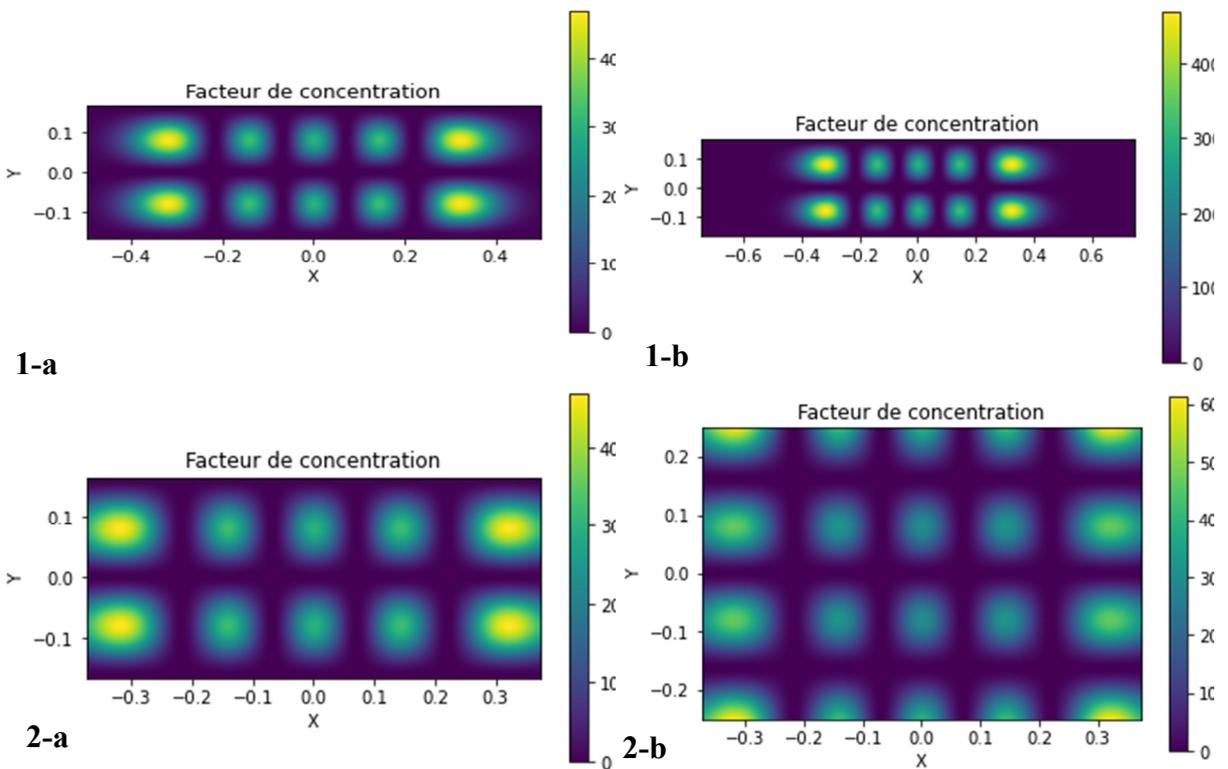
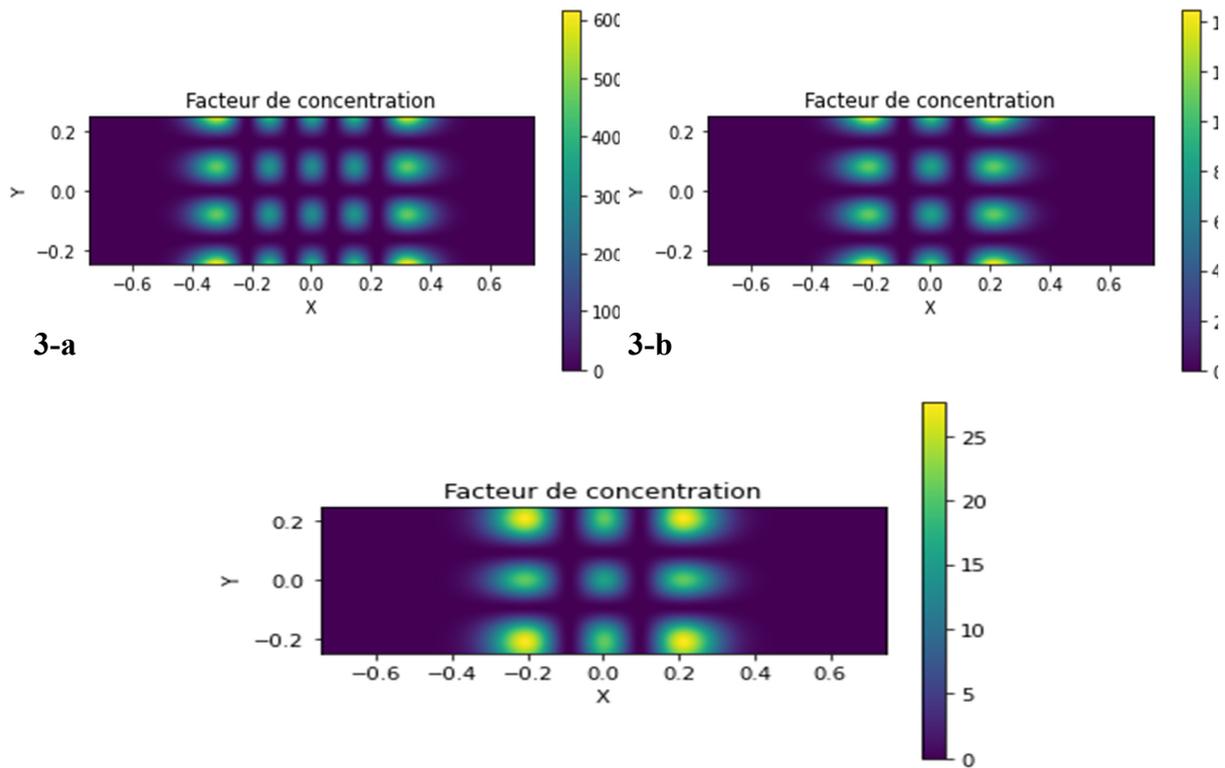


Figure 3.6 : Intensité du réflecteur pour différents diamètres de longueur d'onde

La figure 3.6 représente la distribution de l'intensité du réflecteur par rapport au tube récepteur en considérant la longueur du tube fixé sur l'axe vertical du récepteur. La distribution du flux radiatif est très différente. Avec 1 mrad, le réflecteur secondaire est utilisé mais un pourcentage élevé du flux est collecté sur la partie basse du tube. A 5 mrad, le réflecteur secondaire est très largement utilisé et l'augmentation du débordement prouve qu'un récepteur plus large serait nécessaire. Cependant, la carte de flux est plus homogène.





**Figure 3.7 :** Répartition du facteur de concentration sur les différents éléments du concentrateur : Vitrage (1-a et 1-b), Réflecteur secondaire (2-a et 2-b), Tube (3-a et 3-b) et Arrière du récepteur (4)

La **Figure 3.7** représente la répartition du facteur de concentration sur les différents éléments du concentrateur. Pour le vitrage, les dimensions transversales retenues sont celle du capteur de 1,5 m de long (un seul miroir par axe de rotation) mais la différence entre les figures a et b c'est la largeur du miroir qui varie entre 0,5 m et 0,1 m. Dans le cas du réflecteur secondaire, les variations sur la hauteur de ce dernier cause la différence de distribution du flux entre les figures a et b. Les figures 3-a et 3-b montrent la différence de distribution du flux pour n tube avec différentes longueurs. Ces répartitions ont été calculées en fixant les paramètres de discrétisation  $N_s$ ,  $N_t$ ,  $N_r$  et  $N_g$ , respectivement à 50, 36, 50 et 30 comme recommander par Veynandt François. Les calculs ont été effectués pour une position du Soleil au zénith pour un nombre de lancers de rayon égal à 2000 suivant la capacité de calcul du processeur de notre ordinateur. Des effets de bord apparaissent sur ces sept figures et identifiant les courbures arrondies apparaissant aux extrémités des taches représentant la répartition du facteur de concentration. D'où, la constatation de la diminution de flux absorbés dans les extrémistes des taches.

### Conclusion :

L'outil de simulation développé permet donc de conduire des études paramétriques. Ici, le récepteur est étudié. Notre programmation python permet de générer des vues réalistes du

système concentrateur. La conception du récepteur est analysée par simulation numérique relative des transferts radiatifs qui doit être complétée par d'autres calculs. La carte de flux met en évidence les inhomogénéités de la distribution du flux sur le pourtour et le long du tube. L'étude aboutit au choix d'un récepteur à un tube. La longueur du récepteur est fixée à 2 m, pour un champ de miroirs de 1,5 m, pour tenir compte de l'étalement de la tache focale. L'analyse des cartes de flux est nécessaire pour valider la conception d'un concentrateur. Cette étude jette les bases d'un processus d'optimisation d'une géométrie de concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel qui peut se faire dans un travail ultérieur avec plus de temps pour mieux comprendre les phénomènes régissant le concentrateur étudié.

---

# **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

---

Parmi les technologies du solaire à concentration, la technologie des collecteurs de type linéaire de Fresnel présente de nombreux avantages. Elle est relativement moins complexe du point de vue technique et présente un fort potentiel de réduction du coût de l'installation. Cependant, il s'agit de la technologie ayant le plus faible rendement. Notre modeste travail a porté sur une simulation simplifiée par l'optimisation d'un collecteur de type linéaire Fresnel par l'utilisation d'outils de dimensionnement.

Le Chapitre I de ce travail a porté sur le rappel des notions et principes de base sur les collecteurs linéaires de Fresnel et sur une revue bibliographique des collecteurs de type linéaire de Fresnel. Nous y avons détaillé les différentes variantes de concentrateur, de récepteur et de système de suivi du soleil. Dans le Chapitre II nous avons décrit le prototype de collecteur de type linéaire de Fresnel que nous avons choisi puis on a défini des paramètres de qualification du collecteur. La modélisation du collecteur a été abordée dans le Chapitre III. Dans ce chapitre, le concentrateur est modélisé sous Soltrace sous le langage Python. L'outil de simulation développé permet donc de conduire des études paramétriques sur le récepteur. La visualisation de la carte de flux, notre programme python permet de générer des vues réalistes du système concentrateur. La conception du récepteur est analysée par simulation numérique des transferts radiatifs. La carte de flux met en évidence les inhomogénéités de la distribution du flux sur le pourtour et le long du tube. L'étude aboutit au choix d'un récepteur où sa longueur est fixée à 2 m, pour un champ de miroirs de 1,5 m, pour tenir compte de l'étalement de la tache focale. Dans la géométrie étudiée, les pertes restent faibles pour une erreur allant jusque 2 mrad. L'ombrage se produit en début de matinée et en fin d'après-midi. Avec une optique moins précise, le réflecteur secondaire est plus utilisé, ce qui homogénéise le flux sur tout le pourtour du tube absorbeur. Les pertes additionnelles dues à une optique moins précise sont ici surtout dues au débordement accru.

### **Perspectives**

En début de ce projet de Master notre ambition était de proposer un prototype du collecteur linéaire de Fresnel performant. Mais il faut plus de temps pour atteindre cet objectif et nous n'avons pas pu arriver à ce stade. Diverses raisons expliquent ces semi-échecs. Dans ce qui suit nous détaillons les différents travaux à entreprendre afin de lever les difficultés rencontrées et atteindre les objectifs initialement visés :

- ✚ Une plateforme expérimentale doit être prêtée par introduction d'un banc d'acquisition de données lors de l'enregistrement du débit. En effet, l'acquisition du débit se fait par lecture et ne peut être sauvegardée. Faute de budget et de matériel disponible chez les revendeurs à cause de la pandémie, nous n'avons pas pu faire l'expérimentation souhaitée.

- ✚ Pour plus de précision, nous souhaitons faire des tests sur une année afin de déterminer expérimentalement et par simulation numérique les pertes optiques mois par mois afin de pouvoir améliorer la conception du prototype.

## Conclusion générale et perspectives

- ✚ L'amélioration de la conception du prototype grâce aux résultats expérimentaux doit viser un rendement global du collecteur supérieur à 50 %.
- ✚ Une étude des pertes thermiques est souhaitable pour mieux justifier la qualité de notre prototype pour une future intégration dans n'importe quel type de centrales.

**Résumé :** L'abondance des ressources solaires en Algérie plutôt que d'être un inconvénient se doit d'être un atout en ceci qu'en "apprivoisant" l'énergie du soleil on peut climatiser les locaux, dessaler l'eau ou encore produire de l'énergie électrique qui fait cruellement défaut aujourd'hui plus qu'hier. Les grands projets comme FRESDEMO (800 kWth-450 °C) en Espagne tendent à démontrer que la concentration solaire utilisant la technologie linéaire de Fresnel est économiquement viable. De plus, la relative simplicité de cette technologie (suivi sur un seul axe, miroirs faciles à mettre en œuvre etc.) suscite l'engouement de plusieurs chercheurs. Notre travail a consisté à mettre sur pieds un prototype de concentrateur linéaire de Fresnel fonctionnel. Nous souhaiterons présenter la méthode à utiliser pour élaborer le programme de suivi solaire. Quelques tests vont valider le bon fonctionnement mécanique du prototype mais aussi la capacité de focaliser sur une cible plane horizontale durant une matinée. Les résultats seront présentés et discutés et des propositions seront faites pour améliorer le prototype.

**Abstract:** The abundance of solar resources in Algeria rather than being a drawback must be an asset in that by "taming" the energy of the sun we can air-condition the premises, desalinate the water or even produce electrical energy which is sorely lacking today more than yesterday. Large projects like FRESDEMO (800 kWth-450 ° C) in Spain tend to demonstrate that solar concentration using linear Fresnel technology is economically viable. In addition, the relative simplicity of this technology (single-axis tracking, easy-to-use mirrors, etc.) has aroused the enthusiasm of several researchers. Our work consisted in setting up a functional prototype of a linear Fresnel concentrator. We would like to present the method to be used to develop the solar tracking program. A few tests will validate the correct mechanical functioning of the prototype but also the ability to focus on a horizontal flat target during a morning. The results will be presented and discussed and proposals will be made to improve the prototype..

**ملخص:** يجب أن تكون وفرة الموارد الشمسية في الجزائر بدلاً من أن تكون عيباً في ذلك من خلال "ترويض" طاقة الشمس يمكننا تكييف المباني وتحلية المياه أو حتى إنتاج الطاقة الكهربائية التي تفتقر بشدة اليوم أكثر من البارحة. تميل المشاريع الكبيرة مثل FRESDEMO (800 kWth-450 ° C) في إسبانيا إلى إثبات أن تركيز الطاقة الشمسية باستخدام تقنية Fresnel الخطية قابل للتطبيق اقتصادياً. بالإضافة إلى ذلك، أثارت البساطة النسبية لهذه التقنية (التتبع أحادي المحور، والمرآيا سهلة الاستخدام، وما إلى ذلك) حماس العديد من الباحثين. يتألف عملنا من إعداد نموذج أولي وظيفي لمكثف فريسنل الخطي. نود أن نقدم الطريقة التي سيتم استخدامها لتطوير برنامج تتبع الطاقة الشمسية. ستتحقق بعض الاختبارات من صحة الأداء الميكانيكي الصحيح للنموذج الأولي ولكن أيضاً القدرة على التركيز على هدف أفقي مسطح خلال الصباح. سيتم تقديم النتائج ومناقشتها وسيتم تقديم مقترحات لتحسين النموذج الأولي.