

III-Introduction :

L'un des procédés les plus intéressants pour convertir le rayonnement solaire direct en énergie électrique est la centrale à tour. Ce type de centrale est composé d'un champ d'héliostats, d'un récepteur solaire situé au sommet d'une tour et d'une boucle thermodynamique de conversion de la chaleur en électricité.[23]

Les centrales à tour sont capables de produire de l'électricité solaire sur une grande échelle. Les héliostats sont l'élément le plus important du point de vue coût dans la composition de ces centrales.

L'héliostat a pour but de réfléchir les rayons solaires incidents vers une cible fixe (la tour) durant toute la trajectoire diurne de l'astre solaire. Pour assurer convenablement sa commande, il est nécessaire de connaître ses paramètres et de déterminer sa position par rapport à la tour, ce qui se traduit par la détermination de son angle d'élévation (nord-sud) et son angle de rotation (est-ouest).

III-1-Héliostat :

L'héliostat, essentiellement formé d'un miroir réfléchissant, est monté sur une monture mobile qui devra poursuivre le soleil dans sa course céleste. C'est un dispositif très utilisée dans le domaine de l'astronomie.

Le caractère fortement non linéaire des phénomènes climatiques est un facteur délicat dans la gestion de tels systèmes. Par exemple, la présence de nuages ainsi que les propriétés optiques de l'héliostat sont l'une des causes de variation du taux d'irradiation et donc du rendement énergétique de la centrale [27].

Par ailleurs, même lorsque le ciel est totalement dégagé, la gestion du champ d'héliostats est un problème complexe. Il est important d'assurer une répartition contrôlée (homogène ou non) du flux solaire sur le récepteur et prévenir toute surchauffe locale qui pourrait endommager ce dernier. [24]



Figure [III.1] : héliostat

III-2-Rayonnement solaire et positionnement d'un héliostat :

Une centrale solaire est composée d'un grand nombre d'héliostats (entre 1 000 et 10 000) répartis sur un vaste terrain. Ces héliostats réfléchissent les rayons incidents sur le même point fixe, l'absorbeur, placé au sommet d'une tour. S'agissant d'un système à forte concentrations, seuls les rayons directs atteignent cet absorbeur et l'énergie solaire diffuse est intégralement perdue [33].

En un lieu donné et à un instant précis la position du soleil est connue, généralement par son azimut a et son élévation h (hauteur). A partir des relations classiques de mécanique céleste [25], la latitude, la longitude et l'altitude définissent l'endroit alors que le jour et l'heure permettent de calculer respectivement la déclinaison de la terre et l'angle horaire. Par convention, on admet que l'azimut du soleil est positif le matin et nul à midi solaire.

III-3-Modélisation du flux réfléchi par un héliostat [28] :

Un héliostat comprend généralement plusieurs miroirs totalisant une surface comprise entre 20 et 60m². Chaque miroir peut être incurvé, c'est-à-dire qu'il possède sa concentration propre, et est ajusté individuellement de manière à réfléchir l'énergie solaire sur une cible. Différents modes de construction coexistent, par exemple plan, cylindrique, cylindroparabolique,... mais nous ne faisons pas de distinction et considérons l'héliostat comme une seule entité.

Cinq caractéristiques sont retenues pour définir un héliostat [30] :

- sa surface réfléchissante
- sa distance focale
- sa surface de tache

- sa concentration maximale
- son rendement optique

Il est important d'expliciter la définition de ces caractéristiques de base.

1-La surface réfléchissante S_H est la surface projetée des miroirs dans le plan de l'héliostat. Elle peut donc être légèrement différente de la véritable surface de réflecteurs si ces derniers sont incurvés.

2-La distance focale F est l'écart héliostat-cible produisant l'image réfléchie la plus petite, ce qui implique une incidence nulle. A incidence nulle, les rayons incidents et renvoyés sont confondus. Cette image recouvre la surface de tache S_{oF} . Les miroirs n'étant pas exempts d'imperfections, le soleil n'étant pas ponctuel, l'image générée n'est pas parfaite. En conséquence la distribution de flux réfléchi n'est pas constante et a plutôt l'allure d'une fonction gaussienne. c'est pourquoi, arbitrairement, on fixe la limite de la tache comme étant le lieu des intensités égales à 1 pour-cent du flux maximum du centre de l'image.

4-La concentration maximale \hat{I}_{of} est aussi déterminée pour une incidence nulle et pour la distance focale. c'est simplement le rapport de l'intensité maximum du centre de l'image et du rayonnement surfacique incident (pour la nomenclature, l'indice of correspond à une incidence nulle et à la distance focale, et le symbole $\hat{}$ indique le centre de l'image).

Trois héliostats français, le **CETHEL 1**, le **CETHEL 2** et le **LASS-soterem** ont été évalués dans des conditions identiques de fonctionnement. Il s'agissait de comparer leurs performances afin de procéder à un choix pour la centrale **THEMIS** située dans le sud de la France

Les caractéristiques de ces héliostats sont résumées dans le tableau III.1

		CETHEL1	CETHEL2	LAAS-soterem
Surface de l'héliostat	m ²	48	53	44
distance focale	m	280	250	290
Surface de la tache	m ²	12	14.7	13.6
Concentration maximale		6.0	6.7	4.4

Tableau III-1 : caractéristiques des héliostats français

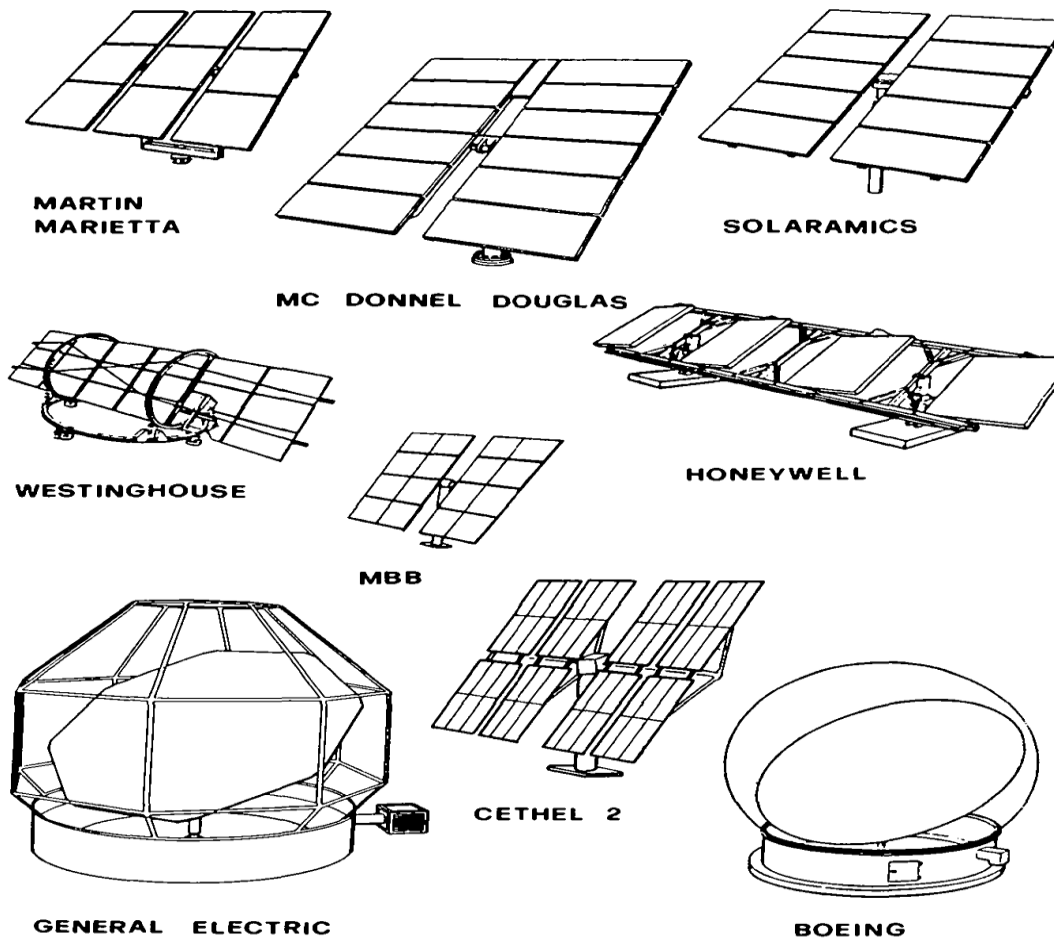


Figure [III.2] : héliostats de première et deuxième génération

III-4-Système de poursuite :

Les montures qui portent les héliostats assurent la rotation de ces derniers selon deux degrés de liberté.

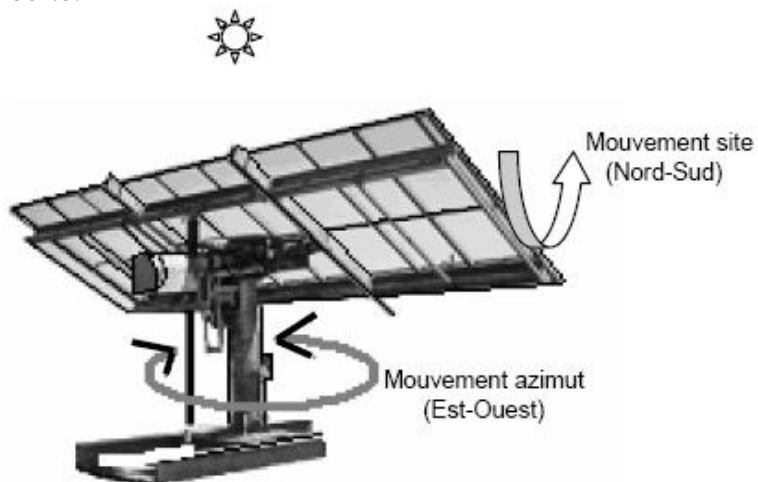


Figure [III.3] : les différents mouvements des héliostats

III-4-1-Les différents types de montures [31]

Il existe trois grands types de montures:

1. La monture **altazimutale**
2. La monture **équatoriale**
3. -la monture **azimutale**

1- La monture azimutale :

Possède deux mouvements très intuitifs : un premier en azimut et un second en hauteur. Ce sont les petites lunettes astronomiques qui bénéficient de cette monture. Mais elles ne permettent pas de compenser le mouvement apparent de la voûte céleste.

2- La monture équatoriale :

Possède quatre mouvements : deux azimutaux pour la mise en station et deux pour le pointage. L'axe d'ascension droite est parallèle à l'équateur céleste. La déclinaison perpendiculaire à l'ascension droite et parallèle à l'axe de rotation de la Terre. On trouve cette monture sur tous les types d'instruments.

Il existe principalement trois types de montures équatoriales :

- la monture à **fourche**
- la monture **allemande**
- la monture à **berceau**

2-a-Avantages de la monture équatoriale :

- Elle peut être entraînée à partir d'un seul moteur fixé en ascension droite (sur l'axe horaire) puisque par définition la déclinaison d'un objet céleste ne varie pas (si cela varie c'est uniquement parce que votre mise à niveau et votre alignement polaire sont imprécis).
- La plupart des modèles (sauf la monture à berceau traditionnelle) peuvent atteindre et suivre n'importe quel objet du ciel
- Facilité d'utilisation car les axes perpendiculaires placés en équatoriaux permettent de balayer le ciel par bande, de faire des "sweep" et des "angles droits", à condition d'avoir une étoile de référence. Ce principe fonctionne tant avec une monture manuelle qu'une monture guidée par un système Goto.
- Les cercles de coordonnées équatoriaux permettent de localiser des objets invisibles à l'œil nu et sont plus faciles à utiliser par un système de guidage automatique (cercles

digitaux ou système Goto) car les changements de coordonnées ne nécessitent aucun calcul de conversion en temps réel.

2-b-Inconvénients de la monture équatoriale :

- Les montures équatoriales performantes ont tendance à être massives et imposantes, les rendant beaucoup moins portables que les montures altazimutales. Dans les cas extrêmes tous les composants de la monture doit être démontés.
- La monture équatoriale allemande est encombrante. Elle requiert la fixation de contre-poids sur la flèche de l'axe de déclinaison pour équilibrer le tube optique et ses accessoires. Cet appendice peut être un obstacle lorsque plusieurs personnes tournent autour de l'instrument, surtout de nuit.
- Etant donné la longueur des axes équatoriaux ils sont sensibles aux flexions et aux vibrations sauf sur les montures surdimensionnées. Les montures équatoriales à fourche supportant parfois des optiques assez lourdes entre leurs bras, elles ont tendance à fléchir lorsque la latitude du lieu est élevée ou lorsque la fourche est placée dans le plan horizontal. Ces flexions entraînent des erreurs de guidage et des oscillations périodiques pouvant générer des problèmes de vibrations sur les télescopes lourds et disposant d'un long tube optique.
- Les montures équatoriales sont souvent équipées de quatre systèmes de roulements et sont souvent plus chers que les montures altazimutales.
- Un guidage précis nécessite une mise à niveau et un alignement polaire minutieux.

3-La monture altazimutale (les GoTo) :

Il s'agit d'une monture azimutale motorisée sur les deux axes, pilotée par micro-processeur et qui permet le pointage automatique des objets célestes. Elle possède en mémoire plusieurs dizaines d'objets, de nombreux programmes d'observation, ainsi que la possibilité d'observer et de suivre les satellites artificiels.

3-a-Avantages de la monture altazimutale :

- Monture simple qui requiert seulement deux supports verticaux et un support horizontal.
- Monture stable, pas de risque de porte-à-faux ou d'un excès de poids d'un côté ou de l'autre pouvant générer des vibrations ou des problèmes de flexion.
- Plus facilement transportable qu'une monture équatoriale.
- Facile à construire, sa conception peut se réduire au strict minimum

3-b-Désavantages de la monture altazimutale :

- Impossibilité de suivre les objets célestes avec un seul moteur d'entraînement. Pour les longues pauses la monture altazimutale doit être contrôlée par un ordinateur ou être déposée sur une base équatoriale, mais ici encore le temps de pause est limité à environ 1h25m.
- Impossible de viser un objet au zénith si la monture est motorisée sur les deux axes, - Sur les montures équipées de moteurs d'entraînement, tout changement d'élévation ou d'azimut implique un changement de coordonnées dont les calculs doivent s'établir de manière continue au risque de perdre l'objectif visé.

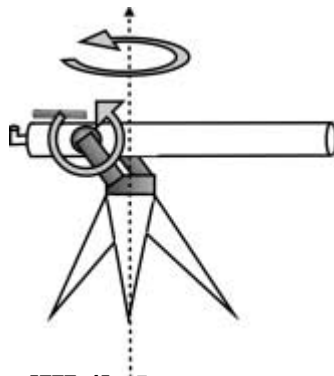


Figure [III.4] : Instrument sur monture altazimutale

III-4-2- La distinction entre le jour et la nuit :

Cette fonction est assurée par un élément sensible à la lumière, c'est le **photorécepteur**.

1- La photoréception [29] :

Le sélénium (**Se**) a été le premier élément photorésistant connu et utilisé dans l'industrie (mise en évidence de l'effet photovoltaïque du sélénium en 1877). De nos jours, de nombreux matériaux semi-conducteurs intrinsèques (purs) ou extrinsèques (dopés) sont employés dans la fabrication de photorécepteurs:

a- le sulfure de cadmium (**CdS**) et le séléniure de cadmium (**CdSe**), pour une détection dans le spectre visible.

b- le sulfure de plomb (**PbS**), avec une sensibilité spectrale maximale située entre 1,8 μm et 2,5 μm est utilisé principalement dans les détecteurs de flamme.

c- le silicium (**Si**) présente la meilleure sensibilité spectrale aux longueurs d'onde émises par l'arséniure de gallium (**GaAs**): infrarouge proche. Par conséquent, c'est le semiconducteur qui entre le plus souvent dans la réalisation des photorécepteurs associés aux émetteurs infrarouges.

d- le tellure de plomb (**PbTe**), le tellure de cadmium (**CdTe**).

2- Une photorésistance est un composant électronique dont la résistivité varie avec la lumière qui l'éclaire. On le nomme aussi résistance photo-dépendante – **light dependent resistor (LDR)** – ou photoconducteur.

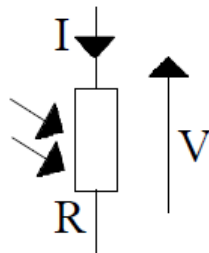
Ces composants passifs exploitent le principe de la photoconduction. La photoconduction est un effet photoélectrique qui se manifeste par une diminution de la résistivité d'un matériau irradié: la libération dans le matériau de charges électriques (paires électron- trou) sous l'influence du rayonnement provoque une diminution de sa résistivité.

3-Principe :

Si un cristal semi-conducteur est soumis à une radiation lumineuse, l'énergie apportée par les photons peut libérer certains électrons utilisés dans les liaisons covalentes entre atomes du cristal. Plus le flux lumineux est intense, plus le nombre d'électrons disponibles pour assurer la conduction est grand et plus la résistance est faible.

La résistance de la LDR est donc inversement proportionnelle à la lumière reçue

4-Symbole :



5-Loi de variation de la résistance R :

$$R = R_0/R_p$$

R₀: Résistance de la cellule dans l'obscurité

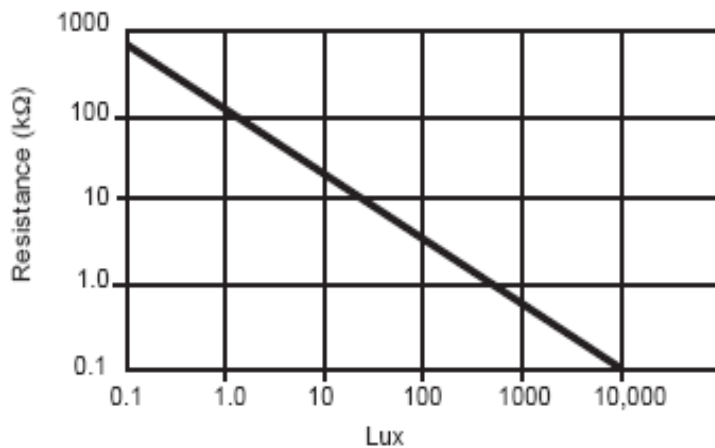
R_p: Résistance déterminée par l'effet photoélectrique du flux incident

$$R_p = a E^{-\gamma}$$

E: Eclairage (flux incident)

a: constante dépendant du matériau et de la température

γ: coefficient compris en général entre 0,5 et 1

6-Exemple de caractéristiques d'une photorésistance en fonction de la lumière :**7-Remarque:**

Une photorésistance est un capteur non linéaire ayant une sensibilité décroissante lorsque le flux incident augmente, sauf dans le cas particulier où $\gamma=1$. Cependant, un fonctionnement quasi linéaire demeure possible en "petits signaux", lorsque l'information est associée à de faibles variations du flux incident, autour d'une valeur constante très supérieure.

III-5-La position de l'héliostat par rapport à la tour [26]:

Il a été une longue tradition depuis le début de l'application des héliostats que l'alignement du miroir d'héliostat se rapproche de la courbure sphérique. L'héliostat classique souffre d'un forte astigmatisme, aberration rencontrée chaque fois que la réflexion est hors-axe, ce qui est la plupart du temps réalisé dans les situations réelles. L'aberration augmente la taille de l'image du soleil dans la cible considérablement par rapport à la situation dans l'axe, conduisant à une perte de déversement important, une réduction du flux moyen sur le récepteur, et une réduction de l'efficacité du récepteur. Plusieurs auteurs ont tenté de s'attaquer à ce problème. Dans leur théorie détaillée « étude sur l'héliostat traditionnels », **Igel et Hughes** ont réalisé que le montant de l'aberration dépend de l'angle d'incidence mesuré dans le plan tangent, défini par le soleil, le centre de l'héliostat, et la cible. Ils ont souligné que la taille de l'image pourrait être réduite si l'héliostat peut être construit avec une courbure asymétrique, mais cela nécessite que l'héliostat soit aligné avec le plan tangent plutôt que de pointer sur la cible. Ils ont proposé de faire pivoter le cadre d'héliostat autour de la normale du centre de la facette, en plus de l'azimut et les mouvements d'élévation, pour atteindre cet alignement.

Ries et Zaibel et al ont fait une autre proposition visant à utiliser une méthode de montage de cible aligné pour la poursuite solaire. Dans cette méthode, les directions sagittales et

tangentielles sont fixées à l'égard du cadre d'héliostat. L'aberration peut être corrigée en utilisant un héliostat non symétrique avec deux rayons de courbure différents. Ils ont noté que la correction est différente pour chaque cas et ils calculé la courbure asymétrique fixe qui donnerait la meilleure moyenne annuelle de correction.

Chen et al ont proposé un héliostat avec une géométrie dynamique ajustée qui a la capacité d'apporter une correction d'aberration complète. Il est composé d'un certain nombre de petits miroirs mobiles, qui peuvent être manœuvrés pour faire la correction des aberrations de premier ordre. Le nouveau design a été nommé "**non- imaging focusing heliostat**".

III-5-1. Comparaison entre deux types des héliostats:

III-5-1-1. Critère de comparaison : **Zaibel et al [32]** utilise la zone de la région éclairée sur la cible souvent appelé la "surface de tache" comme un critère pour comparer les performances de l'héliostat traditionnel et corriger l'aberration. Toutefois, la comparaison de la surface de tache n'est pas suffisante pour la conception pratique. Cette comparaison ne tient pas compte de l'effet de la forme de la surface de tache, qui dans bien des cas est le facteur dominant déterminant la perte de déversement du récepteur et l'efficacité d'interception. Pour un héliostat traditionnel, la forme de la surface déformée a une forme elliptique avec un flux non uniforme la plupart des temps. La perte de déversement peut donc être supérieure à la valeur qui serait estimée en fonction de la surface de points (surface de tache). D'autre part, Une aberration corrigée produira, la plupart du temps, une forme quasi circulaire de la surface. Par conséquent, une comparaison appropriée de la performance de deux types d'héliostats exige la comptabilisation de la forme de la surface.

La taille et la forme de la tache dans le plan du récepteur sont déterminées par deux facteurs principaux: l'effet du disque (la propagation du rayonnement au sein de l'angle solide soutenu par le soleil) et l'aberration astigmatique.

Le niveau de l'aberration de la facette est relativement petit dans des cas pratiques où les facettes d'héliostat sont faibles par rapport à la distance focale. L'aberration résiduelle peut être faible si les facettes sont continuellement ajustées pour fournir une correction astigmatisme dynamique qui suit les variations de l'angle d'incidence. Quand les facettes sont prédéfinies, étant donné une orientation fixe, alors cette aberration est nulle à un angle d'incidence particulier correspondant à la présélection, et plus importante à d'autres angles. Par conséquent, l'aberration résiduelle est la principale source de la différence de la performance de différents héliostats.

En raison du degré élevé de complexité et le grand nombre de paramètres géométriques, il est difficile de généraliser les résultats de la comparaison.

III-5-2.les paramètres de comparaison [26]:

On a comparé entre héliostat classique (**figure 7-a**) et le nouveau type (**figure 7-b**).

Les paramètres utilisés pour la comparaison de la performance des héliostats sont donnés dans le tableau I. L'alignement de la facette des héliostats classiques est présumé correspondre approximativement à une géométrie sphérique fixe, tandis que l'héliostat de rotation-élévation utilise une géométrie de facette fixée en fonction de la procédure de non-imagerie alignement. Les angles d'incidence sont pré-réglés à 0 degré pour les héliostat classiques et 31,4 degrés pour l'héliostat rotation-élévation. L'emplacement de l'héliostat relatif à la tour correspond à la position 7 dans le champ de la **Figure [III.5]**.

Surface d'héliostat	5m*5m
Surface de la facette	1m*1m
La hauteur de la tour	20 m
L'angle da la facette	135°
Latitude	43° nord
La distance de la facette de focalisation	46 m
Distance focale	28.6 m

Tableau I : les paramètres de comparaison entre les deux héliostats

L'effet de disque et l'effet d'aberration pour les miroirs individuels sont insensibles au choix des axes de suivi et de l'inclinaison des héliostats, et sont donc les mêmes pour les deux héliostats. Par conséquent, la différence de performances entre les deux est principalement en raison de l'aberration résiduelle. Cet effet est clairement visible en comparant la propagation d'image résiduelle. Les distributions réparties sur l'image à des moments différents sont présentés sur la **Figure [III.6]**. Les résultats montrent deux distinctions importantes. Tout d'abord, si l'on compare les résultats à un moment donné, nous constatons que la répartition spatiale de la propagation dans l'héliostat traditionnel est inégale, tandis que dans l'héliostat non-imagerie il est presque uniforme. Ce flux non-uniforme créé par l'héliostat traditionnel pourrait être lié à des "points chauds" qui souvent se produisent dans les installations à tour solaire existantes, causant des dommages aux récepteurs.

Une installation solaire avec héliostats aux normes des nouvelles techniques de « **non-imaging** » devrait fournir une distribution plus uniforme du flux et atténuer ce problème. La deuxième observation est que la variation temporelle de la propagation de l'héliostat traditionnel est beaucoup plus grande que celle d'héliostat non-imagerie concentrateur

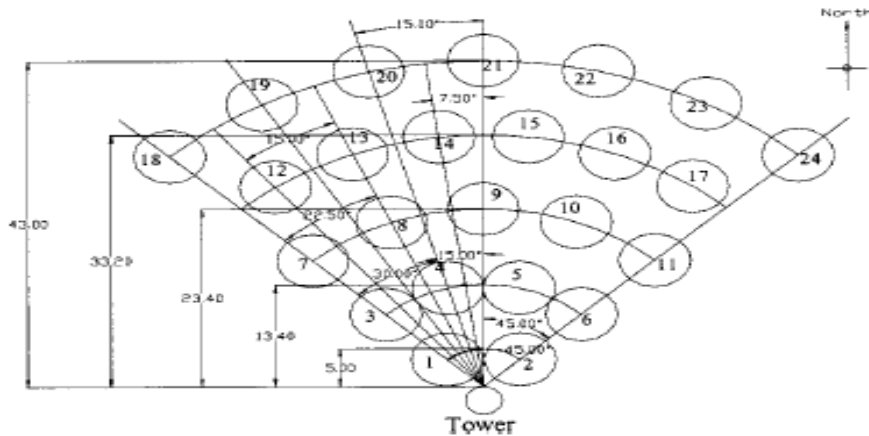


Figure [III.5] : Le plan indique le champ d'héliostats utilisés pour la comparaison entre les deux types de conception héliostat. Les dimensions indiquées sont en mètres. La hauteur de la tour est de 20 m.

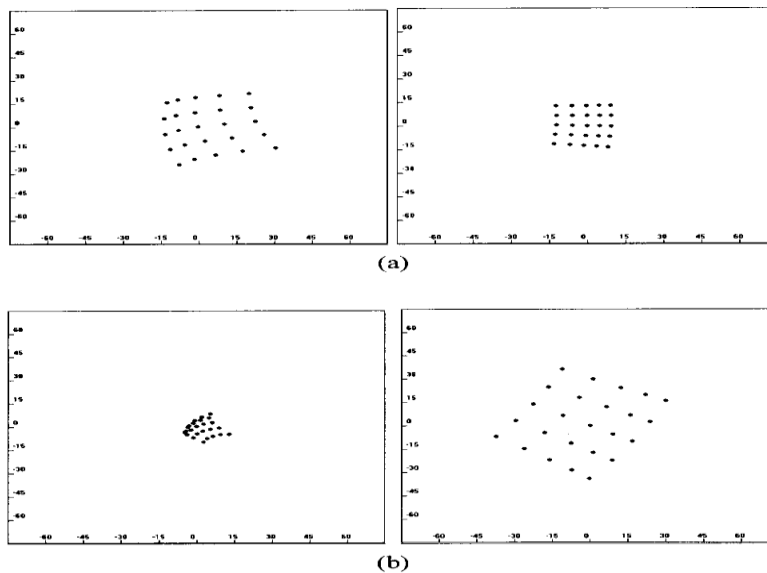


Figure [III.6] : La comparaison de la propagation d'image pour l'héliostat 7 à différents moments au 21 Juin. Les dimensions indiquées sont en cm. Chaque point représente l'intersection sur le plan cible d'un rayon central d'une facette particulier. Côté gauche: l'héliostat traditionnel; côté droit: l'héliostat non-imagerie concentrateur. . A. 7 heures. . B. 9 heures.

III-5-3.L'algorithme du système de poursuite [34] :

Les expressions mathématiques pour les deux méthodes de poursuite solaire sont présentées brièvement ici. Les caractéristiques distinctes des deux héliostats sont schématisées dans la **Figure [III.7]** et la géométrie de l'héliostat relative à la tour est illustrée dans la **Figure [III.8]**.

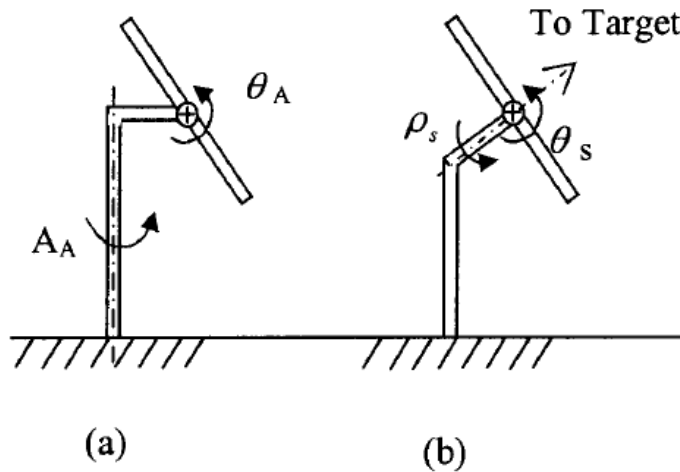


Figure [III.7] : La différence entre les deux héliostats :(a) azimut-élévation ;(b) rotation-élévation

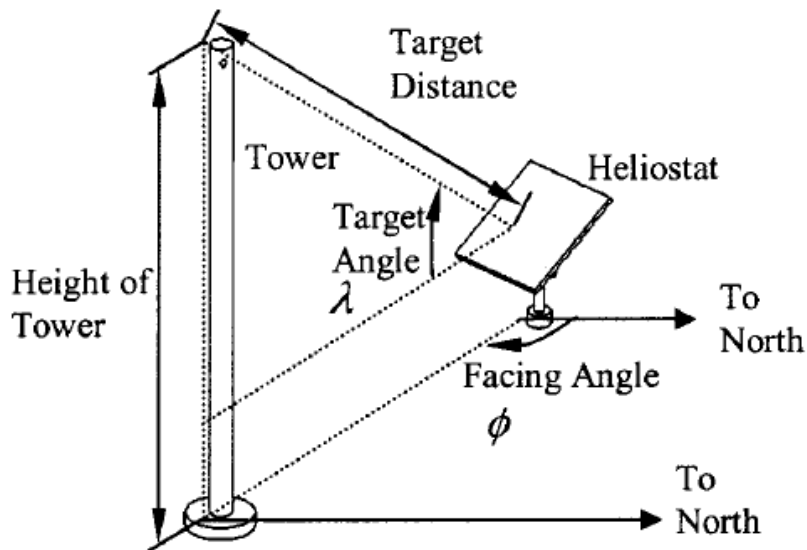


Figure [III.8]: la définition des paramètres géométriques utilisés dans la comparaison

- Pour le suivi d'azimut et d'élévation, l'angle d'azimut A_A et l'angle d'élévation θ_A sont les suivants:

$$A_A = \text{Arc Sin}\left(\frac{\text{Cos}\gamma \sin\theta + \text{Cos}\alpha \sin A}{2 \text{Cos}\theta \text{Cos}\theta_A}\right)$$

$$\theta_A = \text{Arc Sin}\left(\frac{-\text{Sin}\gamma + \text{Sin}\alpha}{2 \text{Cos}\theta}\right)$$

- Pour le suivi de rotation et d'élévation, l'angle de rotation ρ_s et l'angle d'élévation θ_s sont les suivants:

$$\rho_s = \text{Arc Sin}\left(\frac{-\text{Cos}\delta \text{Cos}\omega \text{Sin}\varphi \text{Sin}\theta + \text{Cos}\delta \text{Sin}\omega \text{Cos}\varphi + \text{Sin}\delta \text{Sin}\varphi \text{Cos}\theta}{\text{Cos}\left(\frac{\pi}{2} - 2\theta\right)}\right)$$

$$\theta_s = \theta$$

$$\theta = 0.5 \text{ArcCos}(-\text{Sin}\gamma \text{Sin}\alpha + \text{Cos}\gamma \text{Sin}\varphi \text{Cos}\alpha \text{Sin}A + \text{Cos}\gamma \text{Cos}\varphi \text{Cos}\alpha \text{Cos}A)$$

$$\alpha = \text{Arc Sin}(\text{Sin}\delta \text{Sin}\theta + \text{Cos}\delta \text{Cos}\omega \text{Cos}\theta)$$

$$A = \text{ArcCos}\left(\frac{\text{Sin}\delta \text{Cos}\theta - \text{Cos}\delta \text{Cos}\omega \text{Sin}\theta}{\text{Cos}\alpha}\right)$$

A: l'angle azimuthale.

θ : L'angle d'incidence.

$h = \alpha$: la hauteur du soleil.

$\gamma = \lambda$: l'angle focal

III-6-Conclusion :

Il existe différents types d'héliostat, le meilleur du point de vue performances est l'héliostat « **non- imaging focusing heliostat (rotation-élévation)** ».

La position de l'héliostat varie suivant les coordonnées géométriques propres à chaque site.

Dans ce chapitre on a défini tous les éléments nécessaires pour le calcul dans une centrale à tour, il nous reste à déterminer la logique de commande et le type de moteurs pour assurer les mouvements des héliostats. Ce problème sera traité au 4^{eme} chapitre.