



République Tunisienne  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université de Tunis El Manar  
École Nationale d'Ingénieurs de Tunis



# Rapport de Projet De Fin D'année

## Conception d'un panneau photovoltaïque mural avec dispositif suiveur

---

*Elaboré par :*

Snoussi Syrine Sara

Taamallah Haithem

*Encadré par :*

MR. Jemmali Mohamed

---

2<sup>ème</sup> Année Génie Mécanique

Année universitaire : 2025/2026

## Remerciements

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à **Monsieur Jemmali Mohamed** pour son encadrement attentif et ses conseils précieux tout au long de ce projet. Sa disponibilité, son expertise technique et sa capacité à nous guider avec clarté ont grandement facilité notre progression. À chaque étape, il a su nous orienter, nous apportant des retours pertinents qui nous ont permis de surmonter les obstacles rencontrés et d'affiner notre travail.

Son approche alliant rigueur et bienveillance a créé un environnement propice à l'apprentissage et à l'autonomie, tout en renforçant notre confiance face aux défis techniques. Nous lui sommes profondément reconnaissants pour son investissement et la confiance qu'il nous a témoignée.

Nous remercions également **l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)** pour nous avoir offert cette opportunité enrichissante, qui nous a permis de consolider nos compétences et d'explorer des domaines techniques variés dans un cadre concret et stimulant.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>I</b>
<b>Table des figures</b>	<b>IV</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Contexte et problématique</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction . . . . .	2
1.2 Situation énergétique actuelle . . . . .	2
1.3 Structure et fonctionnement des panneaux photovoltaïques . . . . .	3
1.3.1 Structure d'une cellule photovoltaïque : . . . . .	3
1.3.2 Fonctionnement d'un PV . . . . .	4
1.3.3 Problématique . . . . .	6
1.3.4 Objectifs . . . . .	6
1.4 Méthodologie adoptée . . . . .	7
<b>2 Optimisation de la récupération d'énergie solaire : Modélisation, Analyse et Simulation Numérique</b>	<b>9</b>
2.1 Introduction . . . . .	9
2.2 Modèle analytique . . . . .	9
2.2.1 Modèle géométrique . . . . .	9
2.3 Mise en œuvre numérique et Analyse des configurations : . . . . .	22
2.3.1 Algorithme et code de calcul Python . . . . .	22
2.3.2 Premiers résultats et vérification du code développé . . . . .	24
2.3.3 Energie annuelle récupérable pour différentes configurations . . . . .	27
<b>3 Conception et intégration du dispositif suiveur</b>	<b>29</b>
3.1 Introduction . . . . .	29
3.2 Solutions de principe : . . . . .	29
3.2.1 Type du suiveur : . . . . .	29

3.2.2	Choix du dispositif de contrôle de $\beta$ . . . . .	30
3.3	Développement de la solution retenue . . . . .	33
3.3.1	Schéma global et dimensions du panneau . . . . .	33
3.3.2	Calcul des dimensions globales . . . . .	34
3.3.3	Dimensionnement du dispositif de transformation de mouve- ment . . . . .	39
3.4	Conception sur CATIA V5 . . . . .	41
3.4.1	Description des composants principaux . . . . .	42
3.4.2	Solutions technologiques . . . . .	45
<b>Conclusion</b>		<b>50</b>
<b>Annexe</b>		<b>51</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>55</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>55</b>

## Table des figures

1.1	Puissance installée pour l'autoconsommation solaire PV [1]. . . . .	3
1.2	Structure d'une cellule PV [3]. . . . .	4
1.3	Effet photovoltaïque sur une cellule PV [4]. . . . .	5
1.4	Principe angle d'incidence. . . . .	6
1.5	Angle d'incidence en fonction de $\beta$ et $\gamma$ [5] . . . . .	7
2.1	Mouvement de la terre autour du Soleil [6]. . . . .	10
2.2	Variation de l'angle horaire [5]. . . . .	11
2.3	Variation de l'angle de déclinaison [5]. . . . .	12
2.4	Système de coordonnées de la surface terrestre pour un observateur à Q [5]. . . . .	14
2.5	Système de coordonnées centré sur la Terre pour le vecteur directionnel du rayon solaire défini en termes de l'angle horaire ( $\omega$ ) et de l'angle de déclinaison ( $\delta$ ) [5]. . . . .	15
2.6	Vue composite des Figures 2.4 et 2.5 [5]. . . . .	17
2.7	Angle d'incidence [5]. . . . .	17
2.8	Les différents types de rayonnement solaire [8]. . . . .	19
2.9	L'évolution du l'irradiance directe [7]. . . . .	21
2.10	Comparaison des azimuts en fonction du temps local pour différentes dates . . . . .	25
2.11	Comparaison des élévations en fonction du temps local pour différentes dates . . . . .	25
2.12	Comparaison des $\cos(\theta)$ en fonction du temps local pour différentes dates . . . . .	26
2.13	Comparaison des intensités en fonction du temps local pour différentes dates . . . . .	26
3.1	Schéma global du systeme . . . . .	30
3.2	Schéma cinématique de la solution avec Moteurs-accouplements . . . . .	31
3.3	Schéma cinématique de la solution avec crémaillère-pignons . . . . .	32
3.4	Schéma cinématique de la solution avec poulies-courroies . . . . .	32

3.5	Schéma cinématique de la solution avec Vérin électrique et biellettes	33
3.6	Schéma global du panneau avec suiveur à 1 axe . . . . .	34
3.7	Courbe représentative de $\cos(\theta)$ dans le cas où $\beta = 45^\circ$ . . . . .	36
3.8	Courbe représentative de l'Angle d'incidence dans le cas où $\beta = 45^\circ$	37
3.9	Courbe représentative de $\cos(\theta)$ dans le cas où $\beta = 50^\circ$ . . . . .	38
3.10	Courbe représentative de l'Angle d'incidence dans le cas où $\beta = 50^\circ$	38
3.11	Calcul des paramètres du panneau en fonction du déplacement x . .	39
3.12	Solution en CATIA . . . . .	42
3.13	châssis . . . . .	43
3.14	Support . . . . .	43
3.15	Palier à rotule . . . . .	44
3.16	Vérin électrique . . . . .	45
3.17	fourchette fileté et embout à rotule . . . . .	45
3.18	Liaison linéaire annulaire . . . . .	46
3.19	Liaison rotule . . . . .	46
3.20	jeu fonctionnel . . . . .	46
3.21	Mécanisme de la solution . . . . .	47
3.22	guidage en translation . . . . .	47
3.23	vue éclatée de l'ensemble . . . . .	48
3.24	Panneau au cours de la journée . . . . .	48
3.25	Panneau au repos . . . . .	49

# Introduction Générale

En raison des enjeux liés au changement climatique et de l'urgence de changer nos modes de consommation énergétique, l'ingénierie moderne est essentielle pour la transition vers des solutions durables.

Dans ce contexte, l'utilisation pertinente de l'énergie solaire ne se limite pas à une avancée technologique, mais constitue une réponse stratégique aux défis environnementaux, économiques et sociaux actuels.

Ce projet s'aligne parfaitement avec cette approche, ce qui nous a amené à réaliser d'abord une étude approfondie du rayonnement solaire en Tunisie selon les différentes orientations possibles. Sur la base de cette analyse, nous avons ensuite étudié et comparé plusieurs solutions afin de proposer une conception permettant de maximiser l'apport de l'énergie solaire.

# Chapitre 1

## Contexte et problématique

### 1.1 Introduction

Dans un contexte mondial caractérisé par la transition énergétique et la quête de solutions durables , la Tunisie se trouve face à plusieurs défis majeurs vu la dépendance des énergies fossiles en provenance de l'étranger et la demande qui ne cesse d'augmenter d'une année à une autre ce qui nécessite un recours vers l'énergie renouvelable , notamment l'énergie solaire. Dans ce chapitre , on va tout d'abord analyser par des statistiques la position énergétique actuelle en Tunisie ,ensuite on va se concentrer sur le fonctionnement des panneaux photovoltaïques tout en abordant le phénomène photovoltaïque.

### 1.2 Situation énergétique actuelle

Le secteur énergétique en Tunisie est confronté à plusieurs défis stratégiques, économiques, sociaux et environnementaux. En effet, la production de l'énergie électrique en Tunisie dépend essentiellement de l'énergie fossile, spécialement du gaz naturel qui représente 97% de la production totale, dont la majorité provient de l'étranger. De plus, la demande d'électricité devient de plus en plus importante, augmentant le déficit de la balance énergétique pour atteindre les 50% en 2018. Vu cette situation énergétique, la Tunisie a établi une nouvelle approche énergétique basée sur les ressources renouvelables, cette approche a pour objectif de réduire 30% de sa consommation d'énergie primaire à l'horizon de 2030, dont 15% à partir de l'énergie solaire [1].

Malgré que le marché Tunisien reste peu développé comparé aux pays voisins, il reconnaît une croissance significative ces dernières années, ce diagramme illustre l'évolution des systèmes installés dans un cadre de projet en Tunisie :



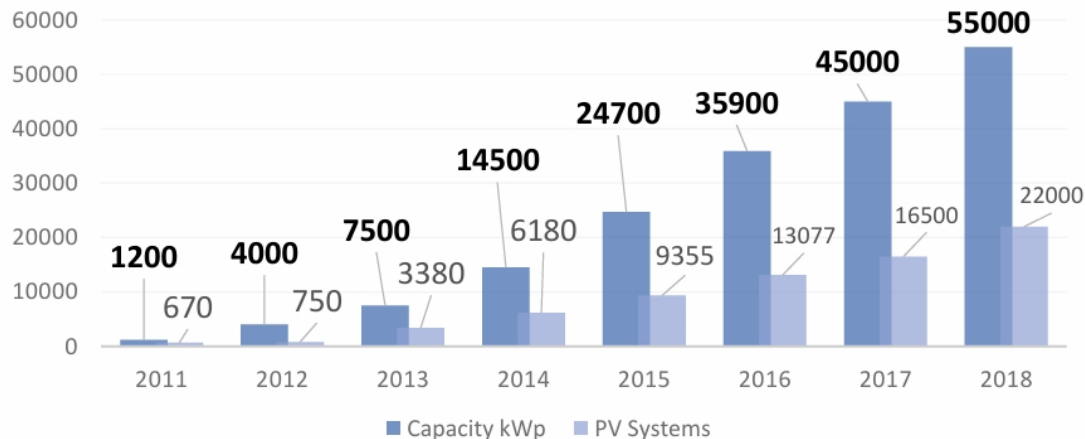


FIGURE 1.1 – Puissance installée pour l'autoconsommation solaire PV [1].

Généralement, les panneaux solaires en Tunisie sont concentrés au niveau des sites résidentiels, ces systèmes sont installés au niveau des toits pour avoir un rendement optimal qui peut atteindre 24% pour les cellules en silicium monocristallin. Bien que ces panneaux constituent une solution durable, l'entretien et les coûts élevés des cellules restent encore des défis majeurs actuellement.

Les "panneaux photovoltaïques muraux" peuvent être une solution efficace. En effet, ces systèmes sont caractérisés par : Une facilité d'entretien puisqu'ils sont moins exposés aux facteurs extérieurs (poussières, vent, pluie...), une optimisation de l'espace en exploitant les surfaces verticales inutilisées ce qui convient surtout aux bâtiments résidentiels et une sécurité plus élevée en minimisant le risque de chutes des panneaux en cas de vents violents.

## 1.3 Structure et fonctionnement des panneaux photovoltaïques

### 1.3.1 Structure d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules des panneaux photovoltaïques (PV) sont constituées par :

**Couche anti-reflet** : cette couche sert à assurer un maximum d'absorption des rayons solaires en réduisant la réflexion.

**Contacts métalliques** : nécessaires pour l'obtention d'un courant continu, il existe deux contacts, un contact avant qui sert à introduire le rayon solaire et un contact arrière pour assurer une bonne conduction du courant.

**Une jonction** : appelée "jonction PN" formée par l'union de deux couches dopées de manière opposée, comme illustrée dans la Figure 1.2 :

**Une couche N** : est une couche semi-conductrice généralement en silicium, on réalise un dopage négatif en introduisant des éléments de type donneur qui possèdent un électron de valence supplémentaire que les silicium (phosphore (P), l'arsenic (As)...) ce dopage nous permet d'avoir une couche riche en électrons libres.

**une couche P** : est une couche semi-conductrice dopée positivement par le fait d'introduire des éléments receveurs d'électrons (bore(B),Aluminium(Al)...) ce dopage crée un déficit d'électrons qu'on l'appelle 'trous d'électrons' qui se comportent comme des charges positives [2].

La Figure suivante illustre les différentes composantes d'une cellule PV :

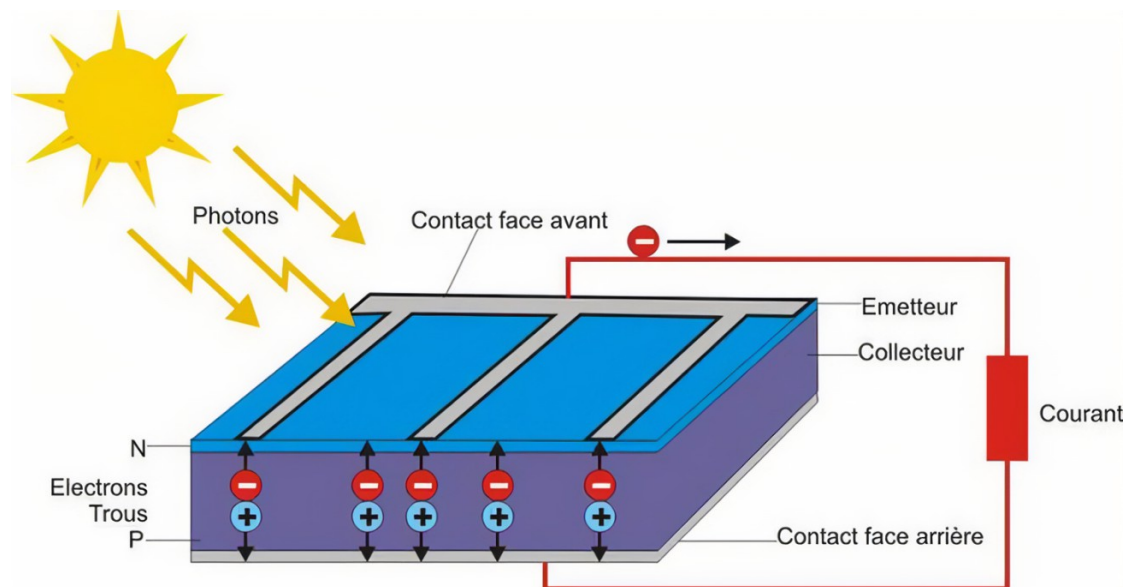


FIGURE 1.2 – Structure d'une cellule PV [3].

### 1.3.2 Fonctionnement d'un PV

En absence de rayonnement solaire, c'est-à-dire à l'état initial, et au niveau de la couche P, les éléments introduits pour le dopage positif sont déficitaires en électrons par rapport au silicium (Si) , par conséquent, ils ont tendance à capter des électrons du reste du matériau.

Pour simplifier l'étude, on prend le cas le plus courant qui est le dopage positif avec le bore (B), cet élément est déficitaire par un seul électron par rapport au Si. Une fois qu'un atome de bore a capté un électron, ce dernier laisse derrière lui un trou d'électrons chargé positivement. Ce phénomène se répète de proche en proche et on dit alors que les trous d'électrons se déplacent par diffusion. Lorsque les deux couches sont en contact, il se produit un gradient de concentration entre ces deux matériaux, en effet, les électrons se déplacent de la couche N vers P et de la même

manière, les trous d'électrons se déplacent de la couche P vers N ,cette diffusion entraine un déséquilibre de charge et conduit à l'apparition d'une charge positive au niveau de la couche N et une charge négative dans la couche p ,par conséquent on obtient une différence de potentiel au niveau de la jonction ce qui induit un champ électrique.

Lorsqu'un photon arrive à la cellule, il transmet une énergie capable d'arracher un électron et par suite la formation de nouveaux trous d'électrons et d'électrons libres qui, à leur tour, ont tendance à trouver leur position de stabilité mais le champ électrique formé au niveau de la jonction va contribuer à la séparation des charges positives et négatives de manière que les électrons seront repoussés vers la couche N et les trous vers la couche P. Les électrons cherchant à se recombinaison avec les trous passent alors par le circuit extérieur créant ainsi un courant électrique continu qu'on appelle "photo-courant", les électrons sont délivrés sous la tension créée dans la jonction PN qu'on appelle la "photo-tension", le produit des deux correspond à la puissance électrique délivrée par la cellule qui convertit ainsi directement une partie de l'énergie lumineuse en énergie électrique, avec un rendement qui correspond au produit des deux énergies, traduisant l'efficacité de cette transformation, et une puissance crête qui représente la production maximale en conditions standards. Cependant, les cellules photovoltaïques courantes sont disposées d'une manière plane selon des orientations fixes. Elles ne peuvent pas s'adapter aux variations d'ensoleillement ni aux facteurs extérieurs qui les mettent en danger.

Ces limitations ouvrent la voie à d'autres configurations qui possèdent beaucoup d'avantages, notamment les panneaux photovoltaïques muraux, qui feront l'objet de notre étude.

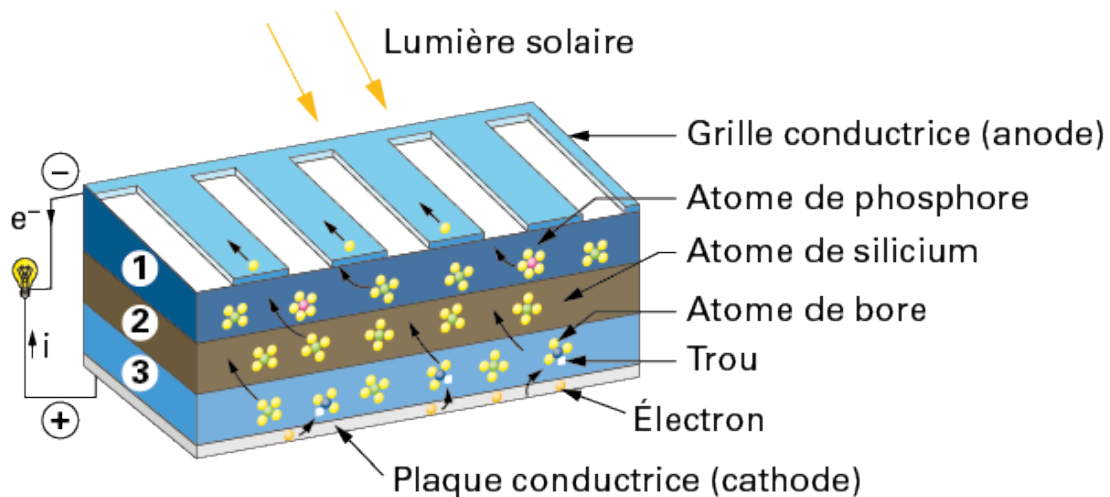


FIGURE 1.3 – Effet photovoltaïque sur une cellule PV [4].

### 1.3.3 Problématique

Les panneaux photovoltaïques peuvent être installés dans différents endroits sous plusieurs configurations. On les trouve généralement sur les toitures inclinées des bâtiments, qu'ils soient industriels ou urbains, intégrés en fonction des contraintes d'espace au sol, ou encore fixés verticalement sur les murs, d'où l'appellation de panneaux photovoltaïques muraux. Cette configuration est moins courante, mais elle offre plusieurs avantages tels que l'accessibilité pour l'entretien, la simplicité d'installation, ainsi qu'une meilleure protection contre les intempéries, notamment le vent et la grêle, qui constituent un problème majeur pour la configuration en toiture. Cependant, leur rendement est très faible, en raison de leur position défavorable pour capter l'énergie solaire, ce qui rend cette solution moins performante.

### 1.3.4 Objectifs

L'objectif essentiel de ce projet consiste à améliorer le rendement d'un panneau Photovoltaïque mural, pour ce faire, il faut tout d'abord identifier les paramètres influençant l'efficacité du panneau. Parmi ces paramètres l'angle d'incidence ( $\theta_i$ ), mesuré entre les rayons solaires et la normale à la surface, qui joue un rôle clé.

la Figure ci-dessous illustre l'effet de l'angle d'incidence sur la surface éclairée :

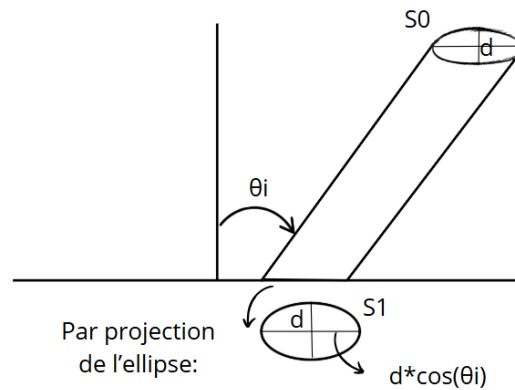


FIGURE 1.4 – Principe angle d'incidence.

Nous représentons le rayonnement solaire incident par un faisceau cylindrique de diamètre  $d$ , de section

$$S_0 = \frac{\pi d^2}{4}.$$

La surface éclairée forme alors une ellipse de section

$$S_1 = \frac{\pi d^2}{4 \cos(\theta_i)} = \frac{S_0}{\cos(\theta_i)}.$$

La densité d'énergie sur la surface du panneau est ainsi plus faible que celle du faisceau incident.

Cette représentation permet de visualiser l'importance de la variation de l'angle d'incidence, qui influence la surface du panneau captivant l'énergie solaire, et donc la quantité d'énergie récupérable. Ainsi, pour améliorer le rendement d'un panneau mural, nous devons trouver une solution permettant d'adapter sa position de manière à minimiser cet angle d'incidence.

## 1.4 Méthodologie adoptée

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons suivi une méthodologie qui comporte trois étapes en nous focalisant sur l'évolution de  $\cos(\theta_i)$ , qui est un facteur déterminant de l'énergie annuelle récupérable.

**Première étape :** Nous avons mis en place un modèle qui nous permet d'identifier les paramètres dont l'angle d'incidence dépend. À partir de ce modèle, nous avons pu tirer la conclusion que ce dernier dépend du temps, de la localisation géographique du panneau et de son orientation définie par deux angles :  $\beta$  (angle d'inclinaison par rapport au sol) et  $\gamma$  (l'angle azimutal de la surface). Ce modèle géométrique, que nous allons représenter par le biais d'une figure explicative, constitue la base de calcul de  $\cos(\theta_i)$ .

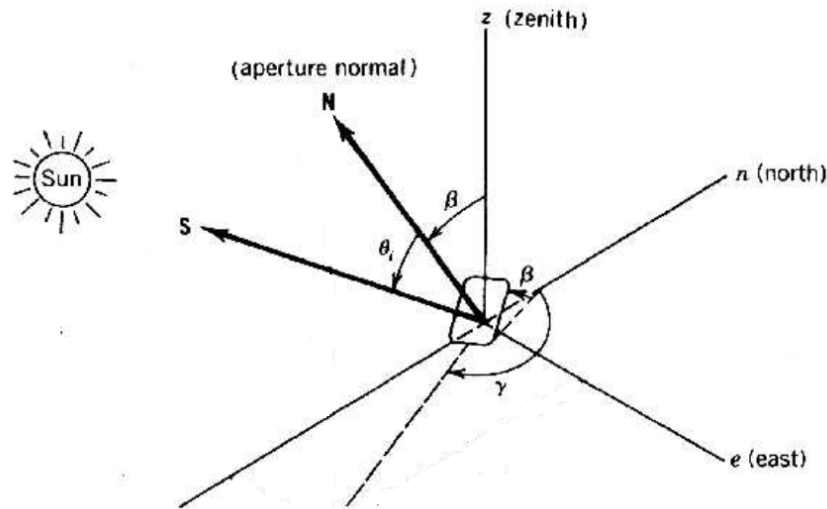


FIGURE 1.5 – Angle d'incidence en fonction de  $\beta$  et  $\gamma$  [5]

**Deuxième étape :** Une fois ce modèle établi, nous avons évalué l'énergie récupérable par an selon trois orientations du panneau : plein sud, sud-est et sud-ouest.

Ensuite, pour chacune de ces orientations, nous avons cherché l'évolution optimale de  $\beta$  qui maximise l'énergie annuelle.

Ces deux étapes feront l'objet du chapitre deux, où elles seront détaillées en mettant en place un modèle analytique et une simulation numérique réalisée en Python, qui permet de valider les résultats théoriques obtenus.

**Troisième étape :** Nous avons choisi une solution qui nous permet de maximiser l'énergie annuelle récupérable par notre panneau, et ensuite, nous sommes passés à la conception mécanique à l'aide du logiciel CATIA V5.

## Chapitre 2

# Optimisation de la récupération d'énergie solaire : Modélisation, Analyse et Simulation Numérique

### 2.1 Introduction

Durant ce chapitre, nous allons proposer une modélisation analytique et numérique pour optimiser l'orientation des panneaux photovoltaïques muraux. L'objectif est de maximiser l'énergie récupérable, donc leur rendement, en ajustant dynamiquement l'angle d'inclinaison en fonction de la trajectoire solaire.

### 2.2 Modèle analytique

Le modèle géométrique présenté ici est classique et est largement reconnu dans l'étude des systèmes solaires. Il est inspiré du livre *Power From The Sun* de William B. Stine et Michael Geyer, qui en propose une description claire et rigoureuse [5].

#### 2.2.1 Modèle géométrique

**Les orbites de la Terre en relation avec le Soleil :** Le trajet de la Terre autour du soleil, ce qu'on appelle son orbite, décrit une trajectoire elliptique qui suit un sens antihoraire vu du pôle nord . Ce mouvement est périodique et dure plus de 365 jours, soit une année sidérale, à une vitesse de 30km/s . Une année se décompose en quatre périodes saisonnières du a l'inclinaison de l'axe de la Terre, qui modifie notre réception de la lumière solaire.

Ainsi, pendant l'été, l'hémisphère qui est incliné vers le Soleil reçoit plus de lumière, entraînant des journées plus longues et des températures plus chaudes contrairement

a ce qui se passe en hiver. L'orbite terrestre est caractérisée par des événements remarquables tels que les solstices, les équinoxes et les apsides.

Les solstices représentent les deux moments de l'année où l'inclinaison de la Terre par rapport au Soleil atteint son maximum. On distingue deux solstices : le solstice d'été (21 juin) et le solstice d'hiver (21 décembre)

Les équinoxes se manifestent quand le jour et la nuit ont presque la même durée, en raison de l'orientation de la Terre, dont l'axe de rotation est perpendiculaire à la ligne reliant la Terre et le Soleil. Ils se produisent aux environs du 21 mars et du 23 septembre.

Les apsides désignent les positions de l'orbite elliptique d'un corps céleste, tel que la Terre, où ce dernier se situe soit à la distance minimale : l'aphélie qui se trouve entre le 3 et le 5 juillet, soit à la distance maximale du Soleil : la périhélie qui se situe entre le 2 et le 5 janvier.

Ce sont donc les deux points extrêmes de l'orbite.

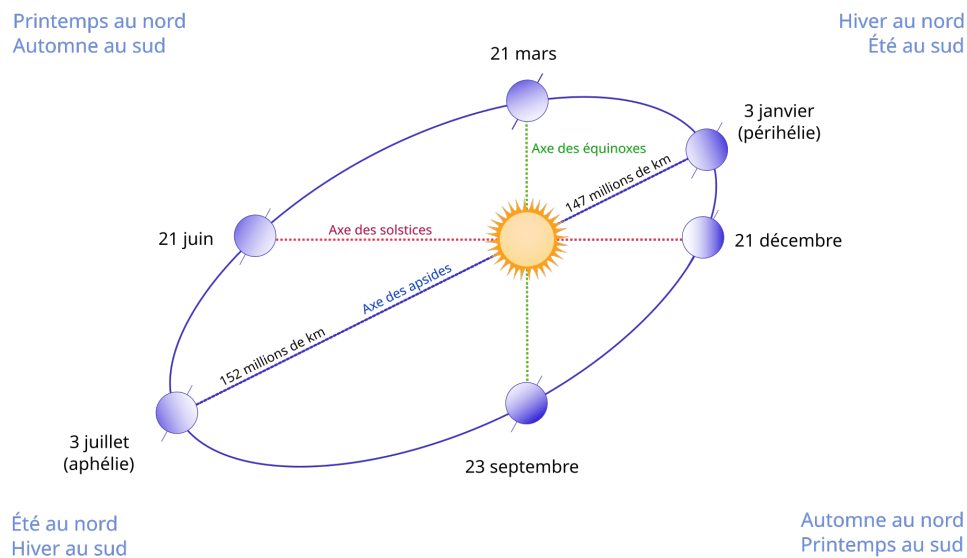


FIGURE 2.1 – Mouvement de la terre autour du Soleil [6].

Les variations du mouvement de notre planète agissent sur la durée des jours et des nuits ce qui rend la mesure du temps inconstante. Pour y faire face, un système basé sur le temps moyen a été construit, garantissant une référence universelle.

**Angle horaire ( $\omega$ ) et équation du temps :** Afin de décrire la rotation de la terre autour de son axe polaire, on introduit la notion de l'angle horaire. Ce dernier correspond à l'angle entre le méridien de l'observateur et celui contenant le soleil. À midi solaire cet angle est nul car le soleil atteint son point le plus haut dans le



ciel ; c'est le moment ou on dit que le soleil est « au sud » (ou « au nord », dans l'hémisphère sud) car le soleil appartient au plan méridien de l'observateur. Ensuite il augmente de  $15^\circ$  par heure.

Le calcul de l'angle horaire est en relation avec le temps solaire qui est un concept utilisé pour prédire la direction des rayons solaires par rapport un point donné sur la terre donc il dépend principalement de la localisation et il est d'une manière générale différent de l'heure locale qui est définie par les fuseaux horaires.

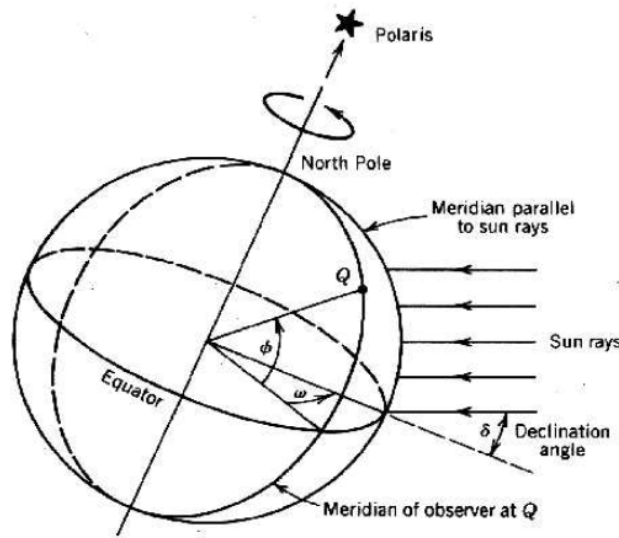


FIGURE 2.2 – Variation de l'angle horaire [5].

Cette relation est mise en œuvre à travers l'équation qui suit :

$$W = 15 \times (t_s - 12) \quad (2.2.1)$$

Comme mentionné précédemment dans le paragraphe sur les orbites de la Terre en relation avec le Soleil, notre planète ne se déplace pas de manière uniforme ce qui conduit à la définition de l'équation du temps (EOT) qui représente la différence entre le temps solaire moyen, qui est une estimation régulière du temps en supposant que la Terre se déplace à une vitesse constante sur une trajectoire circulaire, et le temps solaire vrai, qui prend en compte la véritable position de la Terre sur son orbite à un moment précis. Cette notion de l'équation du temps est primordiale pour permettre une conversion juste entre le temps solaire et l'heure locale (LCT), en prenant bien évidemment en considération l'emplacement, le jour de l'année et les normes locales auxquelles les horloges locales sont réglées.

$$EOT = 0.258 \cos x - 7.416 \sin x - 3.648 \cos 2x - 9.228 \sin 2x \quad (2.2.2)$$

où la variable  $x$  est calculée en fonction du jour de l'année  $Nj$  (avec  $Nj = 1$  pour le 1er janvier) :

$$x = \frac{360(Nj - 1)}{365.242} \quad (2.2.3)$$

L'équation de l'heure locale prend la forme suivante :

$$LCT = t_s - \frac{EOT}{60} + LC + D \quad (2.2.4)$$

$D$  est un paramètre qui adapte l'heure selon celle de l'été et  $LC$  est la correction définie par :

$$LC = \frac{\text{local longitude} - \text{longitude du méridien de temps standard}}{15} \quad (2.2.5)$$

**Angle de déclinaison ( $\delta$ ) :** L'angle de déclinaison est celui mesuré entre une ligne reliant le centre de la Terre à celui du soleil et un plan dit plan équatorial qui contient l'équateur de la Terre .

Au solstice d'été (vers le 21 juin), l'angle de déclinaison atteint  $+23,45^\circ$ , avec le Soleil au point le plus haut dans le ciel de l'hémisphère nord.

Pendant les équinoxes (autour du 22 mars et du 23 septembre), l'angle de déclinaison est nul, et le jour et la nuit durent chacun 12 heures.

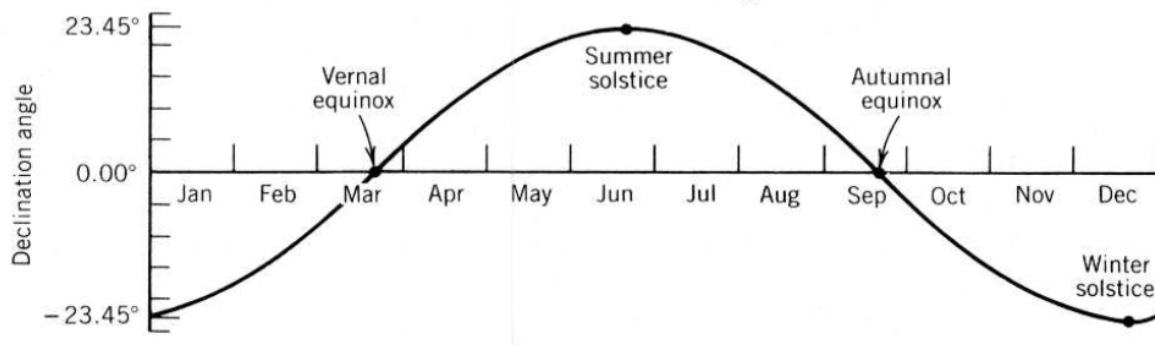


FIGURE 2.3 – Variation de l'angle de déclinaison [5].

**Angle d'élévation ( $\alpha$ ) et Azimuth (A) :** Quand un observateur regarde le Soleil depuis un endroit quelconque sur la planète, il désire toujours définir ses coordonnées par rapport à un repère local, et non dans un système géocentrique. On a donc suivi une démarche précise pour convertir la position du Soleil d'un repère contenant le centre de la Terre à un repère local.

On définit dans toute la suite :

- **Le repère géocentrique :** les axes sont définis comme suit :
  - **p** : axe polaire, aligné avec l'axe de rotation de la Terre.
  - **e** : axe est-ouest, appartenant au plan équatorial.
  - **m** : axe méridien qui appartient à l'équateur au méridien de l'observateur.

La position du Soleil est définie dans ce repère en fonction de l'angle horaire ( $\omega$ ) et de l'angle de déclinaison ( $\delta$ ).

- **Le repère local :**
  - L'axe **z** est vertical et pointe vers le zénith.
  - L'axe **e** est orienté vers l'est.
  - L'axe **n** est orienté vers le nord.

Le passage d'un repère à l'autre est réalisé via une rotation autour de l'axe **e** d'un angle égal à la latitude ( $\phi$ ) de l'observateur.

Dans toute la suite, nous avons pris en compte des hypothèses bien déterminées :

- Puisque la distance Terre-Soleil est très grande (environ **23 525 fois** le rayon terrestre), la différence entre la position du Soleil vue depuis un lieu quelconque sur Terre et depuis le centre de la Terre n'est pas significative. Ainsi, nous avons négligé dans notre modèle les translations dues à la position de l'observateur.
- L'effet de réfraction atmosphérique est ignoré.
- Tous les angles sont mesurés par rapport au rayon solaire central.
- L'azimut est pris du nord au sud et, par conséquent, le sens horaire est considéré comme positif.

La position du Soleil est définie à l'aide de deux angles : l'angle d'altitude solaire ( $\alpha$ ), qui se situe entre le rayon solaire central et un plan horizontal contenant l'observateur, et l'angle zénithal solaire.

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (2.2.6)$$

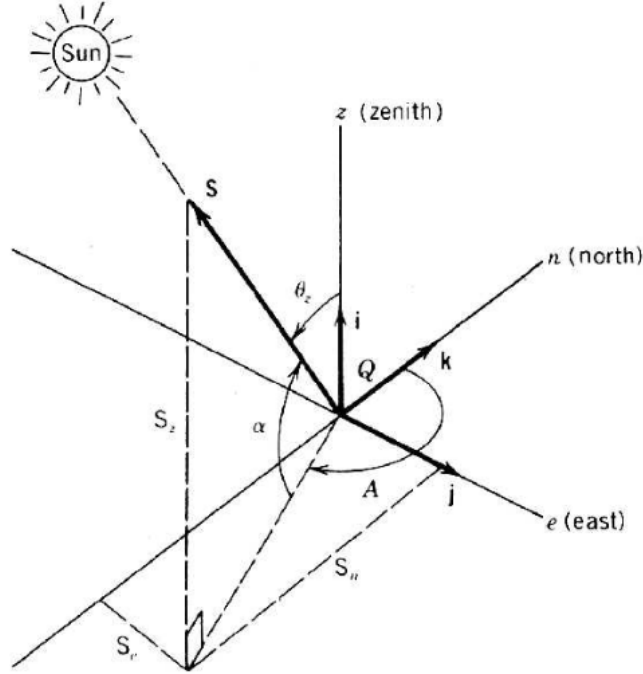


FIGURE 2.4 – Système de coordonnées de la surface terrestre pour un observateur à Q [5].

Afin de déterminer les angles d'élévation et d'Azimut, on doit définir un vecteur unitaire qui pointe vers le Soleil à la surface de la Terre, puis nous le transférerons au centre de la Terre dans un autre système de coordonnées. Définissons donc  $\mathbf{S}$  qui est le vecteur unitaire orienté vers le Soleil depuis la position de l'observateur  $Q$  :

$$\mathbf{S} = S_z \mathbf{i} + S_e \mathbf{j} + S_n \mathbf{k} \quad (2.2.7)$$

Où  $\mathbf{i}, \mathbf{j}$  et  $\mathbf{k}$  sont les vecteurs unitaires selon les axes  $z$  (zenith),  $e$  (est-ouest) et  $n$  (nord-sud) respectivement. Les cosinus directeurs de  $\mathbf{S}$  par rapport à ces axes sont  $S_z, S_e$  et  $S_n$ , et s'expriment en fonction de l'altitude  $\alpha$  et de l'azimut solaire  $A$  :

$$S_z = \sin(\alpha), \quad S_e = \cos(\alpha) \sin(A), \quad S_n = \cos(\alpha) \cos(A).$$

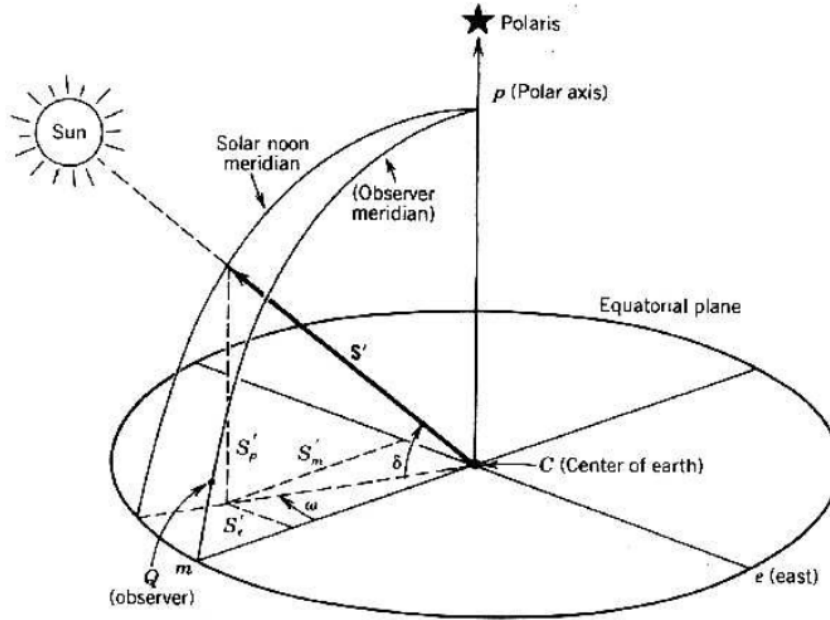


FIGURE 2.5 – Système de coordonnées centré sur la Terre pour le vecteur directionnel du rayon solaire défini en termes de l'angle horaire ( $\omega$ ) et de l'angle de déclinaison ( $\delta$ ) [5].

Faisons maintenant le passage au repère géocentrique, définissons donc le vecteur directionnel  $S'$  pointant vers le Soleil :

$$S' = S'_m u_m + S'_e u_e + S'_p u_p \quad (2.2.8)$$

Avec  $u_m$ ,  $u_e$  et  $u_p$  sont les vecteurs unitaires des axes m,e et p respectivement.

Voici l'écriture matricielle qui illustre ce passage :

$$\begin{bmatrix} S_z \\ S_e \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'_m \\ S'_e \\ S'_p \end{bmatrix} \quad (2.2.9)$$

Passons maintenant à la résolution du système matriciel :

$$\begin{cases} S_z = S'_m \cos \varphi + S'_p \sin \varphi \\ S_e = S'_e \\ S_n = S'_p \cos \varphi - S'_m \sin \varphi \end{cases} \quad (2.2.10)$$

Si on remplace  $S_z$ ,  $S_e$ ,  $S_n$ ,  $S'_m$ ,  $S'_p$  et  $S'_e$  par leurs expressions on obtient :

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \omega \cos \varphi \quad (2.2.11)$$

$$\cos \alpha \sin A = -\cos \delta \sin \omega \quad (2.2.12)$$

$$\cos \alpha \cos A = \sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \cos \omega \sin \varphi \quad (2.2.13)$$

Et finalement on aura l'équation qui illustre l'élévation :

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \omega \cos \varphi) \quad (2.2.14)$$

On cherche maintenant à déterminer l'azimut. Celui-ci peut se présenter par deux expressions équivalentes, présentées ci-dessous, en fonction de l'heure avant ou après le midi solaire et de sa position par rapport à la ligne est-ouest (au nord ou au sud).

$$A' = \sin^{-1} \left( -\frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \right) \quad (2.2.15)$$

Conditions pour le calcul de l'angle azimutal  $A$  :

— Si  $\cos \omega \geq \left( \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \right)$ , alors :

$$A = 180^\circ - A' \quad (2.2.16)$$

— Sinon ( $\cos \omega < \left( \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \right)$ ) :

$$A = 360^\circ + A' \quad (2.2.17)$$

Méthode alternative de calcul :

$$A'' = \cos^{-1} \left( \frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \cos \omega \sin \varphi}{\cos \alpha} \right) \quad (2.2.18)$$

Conditions pour cette méthode :

— Si  $\sin \omega > 0$  :

$$A = 360^\circ - A'' \quad (2.2.19)$$

— Sinon ( $\sin \omega \leq 0$ ) :

$$A = A'' \quad (2.2.20)$$

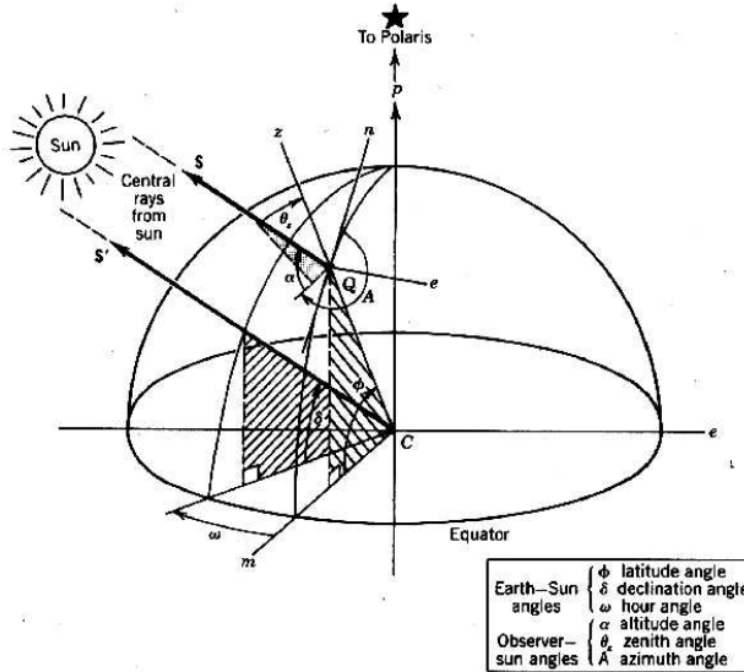


FIGURE 2.6 – Vue composite des Figures 2.4 et 2.5 [5].

**Angle d'incidence solaire :** Dans le développement de systèmes d'énergie solaire, il est nécessaire de calculer l'angle entre les rayons solaires et un vecteur normal à la surface du dispositif qui capte ces rayons. Cet angle est appelé l'angle d'incidence et représente un élément clé pour la suite de notre étude.

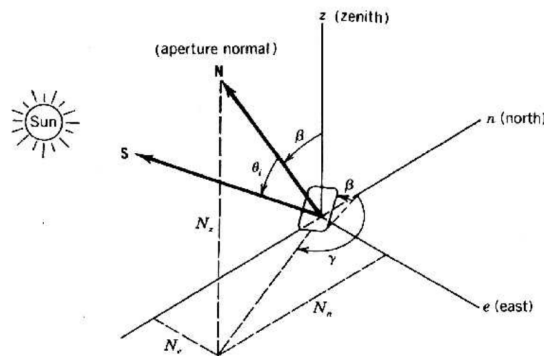


FIGURE 2.7 – Angle d'incidence [5].

Pour le calcul de ce dernier, nous avons effectué le produit scalaire des 2 vecteurs unitaires : le vecteur S qui pointe vers le soleil et la normale au plan du dispositif :

N Avec les cosinus directeurs du vecteur N définis par :

$$N_z = \cos \beta \quad (2.2.21)$$

$$N_e = \sin \beta \sin \gamma \quad (2.2.22)$$

$$N_n = \sin \beta \cos \gamma \quad (2.2.23)$$

Réalisons le produit scalaire :

$$\cos \theta_i = \mathbf{S} \cdot \mathbf{N} \quad (2.2.24)$$

Remplaçons par les cosinus directeurs du vecteur S et ceux de N ,nous obtenons l'équation décrivant l'angle d'incidence solaire :

$$\cos \theta = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(\gamma - A) \quad (2.2.25)$$

où :

- $\beta$  est l'angle que fait le dispositif récepteur avec le sol
- $\alpha$  est l'altitude solaire
- $\gamma$  est l'angle azimutal de la surface
- $A$  est l'azimut solaire

**Calcul de l'irradiation globale :** Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin d'estimer l'irradiation globale est nécessaire pour la conception et le développement de ces systèmes, ainsi que dans l'évaluation de leurs performances.

Le modèle de Capderou est abordé en 1987, c'est une méthodologie qui est basée sur la connaissance du trouble atmosphérique afin de déterminer les différentes composantes du rayonnement solaire d'un site bien précis [7].

L'irradiation globale est définie par la somme de deux composantes : composante directe et composante diffuse.

$$G = I + D \quad (2.2.26)$$

où :

- $I$  :composante directe.
- $D$  :composante diffuse.

**composante directe** : c'est le rayonnement qui atteint la surface d'une manière directe sans être dévié ou diffus par l'atmosphère, il est intense et atteint son maximum lorsque le ciel est clair (pas de nuages, de pollution...)



**Composante diffuse :** c'est un rayonnement qui est diffus dans l'atmosphère et arrive à la terre avec différents angles. Ce type de rayonnement est présent même lorsqu'il y a des nuages dans le ciel. Contrairement au rayonnement direct, il ne suit pas une trajectoire unique.

Cette Figure illustre les différents types de rayonnement :

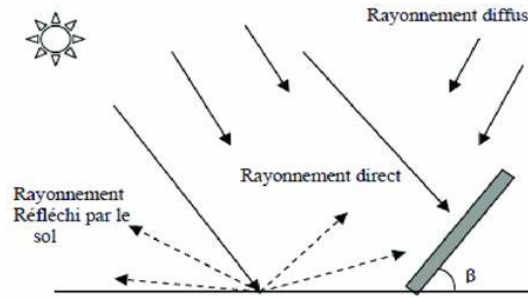


FIGURE 2.8 – Les différents types de rayonnement solaire [8].

Dans la suite, on s'intéressera seulement à la composante directe et, par conséquent, on va négliger la partie diffuse du rayonnement. Comme indiqué précédemment, les calculs dans le modèle de Capderou sont basés essentiellement sur les facteurs de troubles atmosphériques, ce qui nous amène à définir le facteur de trouble de Linke. Le facteur trouble de Linke suppose que le ciel est clair et résulte de la sommation des facteurs liés aussi aux troubles atmosphériques, en effet il est défini par l'équation suivante :

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \quad (2.2.27)$$

où :

- $T_0$  : C'est le trouble lié à l'absorption gazeuse (l'ozone et la vapeur d'eau), dont les concentrations sont variables. Ce facteur est donné par l'équation suivante, en intégrant les paramètres astronomiques terrestres :

$$T_0 = 2,4 - 0,9 \sin(\varphi) + 0,1 (2 + \sin(\varphi)) A_{he} - 0,2z - (1,22 + 0,14A_{he}) (1 - \sin(\alpha)) \quad (2.2.28)$$

où :

- $z$  : l'altitude du site (en km),
- $A_{he}$  : l'alternance hiver-été définie par :

$$A_{he} = \sin \left( \frac{360}{365} \cdot (N - 121) \right) \quad (2.2.29)$$

avec :

- $N$  : le jour de l'année (de 1 à 365).
- $T_1$  : C'est le trouble lié à l'absorption par les gaz de l'atmosphère tels que le  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  et  $\text{O}_3$ , ainsi qu'à la diffusion de Rayleigh. Son équation est illustrée ci-dessous :

$$T_1 = (0,89)^z \quad (2.2.30)$$

- $T_2$  : Ce terme est relatif à la diffusion par les aérosols avec une légère absorption. il est défini par :

$$T_2 = (0,9 + 0,4A_{\text{he}}) (0,63)^z \quad (2.2.31)$$

Une fois que le facteur de trouble de Linke ( $T_l$ ) est déterminé, on peut introduire l'équation de l'irradiance directe sur un plan horizontal :

$$I = I_0 \sin(\alpha) \exp \left\{ -T_l \cdot \left[ 0,9 + \frac{9,4 \cdot \sin(\alpha)}{(0,89)^z} \right]^{-1} \right\} \quad (2.2.32)$$

où :

- $I_0$  : l'irradiance solaire extra-atmosphérique mesurée par unité de surface, avec une valeur de  $1367 \text{ W/m}^2$ ,
- $\alpha$  : l'angle d'élévation du soleil,
- $T_l$  : le facteur de trouble de Linke.

L'irradiance directe reçue sur un plan incliné, en fonction de l'orientation et de l'inclinaison, est donnée par l'équation suivante :

$$I_\alpha = I_0 \cos(\theta) \exp \left\{ -T_l \cdot \left[ 0,9 + \frac{9,4 \cdot \sin(\alpha)}{(0,89)^z} \right]^{-1} \right\} \quad (2.2.33)$$

où :

- $\theta$  : l'angle d'incidence.

La Figure suivante montre les valeurs de l'évolution de l'irradiance directe mesurés et ceux du modèle de Capdreou par ciel clair à Alger lors des différents mois :

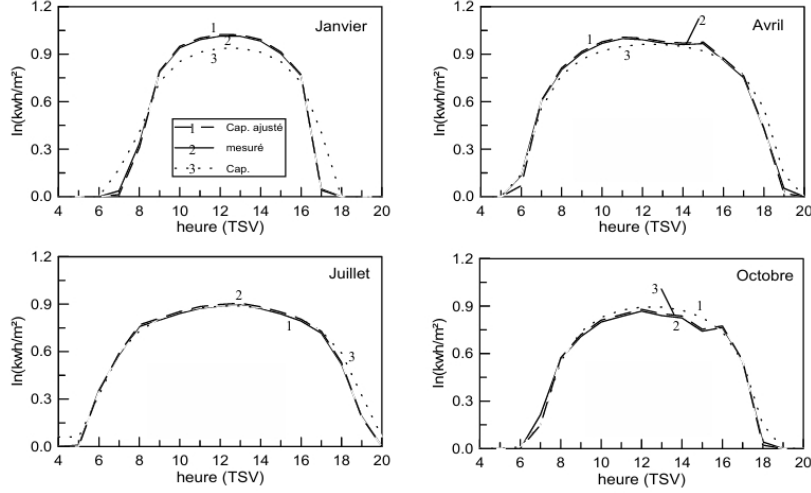


FIGURE 2.9 – L'évolution du l'irradiance directe [7].

En se basant sur les résultats fournis, on constate un léger écart entre les valeurs réelles mesurées et les valeurs théoriques calculées par le modèle de Capderou par conséquent on peut adopter ce modèle pour les calculs nécessaires et la recherche de la solution.

#### Recherche mathématique de $\beta_{\text{optimale}}$ :

**Objectif :** Maximiser  $\cos \theta_i$  pour déterminer la valeur optimale de l'inclinaison  $\beta$  du panneau solaire.

**Expression de  $\cos \theta_i$  :**

$$\cos \theta_i = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(\gamma - A) \quad (2.2.34)$$

**Changement de variable :** En posant

$$a = \sin \alpha \quad \text{et} \quad b = \cos \alpha \cos(\gamma - A) \quad (2.2.35)$$

on peut réécrire  $\cos \theta_i$  sous la forme :

$$f(\beta) = \sqrt{a^2 + b^2} (\cos \zeta \cos \beta + \sin \zeta \sin \beta) \quad (2.2.36)$$

$$= \sqrt{a^2 + b^2} \cos(\beta - \zeta) \quad (2.2.37)$$

où

$$\zeta = \arctan \left( \frac{b}{a} \right) \quad (2.2.38)$$

La fonction  $f(\beta)$  est maximale lorsque  $\cos(\beta - \zeta)$  est maximal, c'est-à-dire égal à 1.

La valeur optimale de  $\beta$  s'écrit alors :

$$\beta \equiv \arctan \left( \frac{\cos \alpha \cos(\gamma - A)}{\sin \alpha} \right) \mod 2\pi \quad (2.2.39)$$

## 2.3 Mise en œuvre numérique et Analyse des configurations :

### 2.3.1 Algorithme et code de calcul Python

Afin d'exploiter le modèle analytique établi qui nous permet de rechercher l'angle d'inclinaison  $\beta$  optimal maximisant l'énergie annuelle récupérable, une mise en œuvre numérique a été réalisée à travers un algorithme qui servira ensuite dans la simulation en `Python` capable d'identifier la meilleure orientation du panneau selon les différentes configurations.

L'algorithme établi est illustré ci-dessous :

---

**Algorithm:** Calcul de l'énergie solaire reçue annuelle

---

**1. Initialisation**

Définir la latitude, longitude, altitude du site  
Définir l'inclinaison et orientation du panneau  
Définir le mode : fixe ou suiveur

**2. Pour chaque jour de l'année (1 à 365)**

Calculer le numéro du jour

**for** *chaque heure de 0h à 24h* **do**

Calcul de l'équation du temps  
Calcul du temps solaire véritable  
Calcul de l'angle horaire  
Calcul de la déclinaison solaire

Calcul de l'élévation et de l'azimut solaire

**end**

**3. Calcul des Troubles atmosphériques**

Calculer  $A_{he}$

Calculer  $T_0, T_1, T_2$  en fonction de l'altitude et de  $\alpha$

Déduire  $T_l = T_0 + T_1 + T_2$

**4. Pour chaque heure, si  $\alpha > 0$**

Calculer  $IL_i$

**5. Calcul du cosinus de l'angle d'incidence  $\theta$**

**if** *mode fixe* **then**

|  $\beta$  est constant

**end**

**else if** *mode suiveur* **then**

|  $\beta$  est ajusté dynamiquement pour optimiser l'angle

**end**

**6. Calcul de l'intensité inclinée**

$IL_{inc} = IL_i \cdot \cos(\theta)$

**7. Intégration journalière**

Intégrer numériquement l'énergie reçue par jour

**8. Accumulation annuelle**

Additionner les énergies journalières

Convertir en kWh

---

L'algorithme présenté ci-dessus a été implémenté en Python. Le code source complet est disponible en Annexe.

L'énergie EL récupérable au cours d'une année est obtenue par un calcul d'intégrale de l'irradiation sur une année présenté ci-dessous :

$$E_L = \int_0^T I_L(\gamma, \beta, t) dt = \sum_{j=1}^{365} E_I(\gamma, \beta, j)$$

- $E_L$  : énergie totale récupérable sur une année pour  $1 \text{ m}^2$  de cellules (et non de panneau) et une localisation  $L(p, \text{longitude})$ .
- $I_L(\gamma, \beta, t)$  : la puissance surfacique instantanée récupérable par une cellule de normale définie par  $\gamma$  et  $\beta$ .
- $T$  : durée d'une année en secondes ( $24 \times 3600 \times 365 = 31\,536\,000 \text{ s}$ ).
- $L$  : localisation du lieu définie par la longitude par rapport à Greenwich et la latitude par rapport à l'équateur.
- $E_I(\gamma, \beta, j)$  : énergie totale récupérable sur la journée  $j$  ( $j \in \{1, 2, \dots, 365\}$ ) pour  $1 \text{ m}^2$  de cellules (et non de panneau) et une localisation  $L$ .

$$E_I(\gamma, \beta, j) = \int_{(j-1) \times T_l}^{j \times T_l} I_L(\gamma, \beta, t) dt = \int_{t_s=0}^{t_s=24} I_L(\gamma, \beta, j, t_s) dt_s$$

- $I_L(\gamma, \beta, j, t_s)$  : la puissance surfacique instantanée récupérable par une cellule de normale définie par  $\gamma$  et  $\beta$  en fonction de l'heure solaire pour une journée  $j$ .
- $T' = 24 \times 3600$  secondes.
- $t$  : temps en secondes s'écoulant sur l'année.
- $t_s$  : temps solaire en heures pour la journée  $j$  ( $t_s \in [0, 24]$ ).

### 2.3.2 Premiers résultats et vérification du code développé

Afin de vérifier le code développé, nous avons commencé par tracer l'évolution de l'azimut et de l'élévation solaires pour deux journées particulières (21 juin et 21 décembre) en considérant la configuration classique d'un panneau orienté plein sud ( $\gamma=180^\circ$ ) et incliné à  $45^\circ$  ( $\beta=45^\circ$ ).

Les courbes d'azimut obtenues sont présentées dans la Figure ci-après.

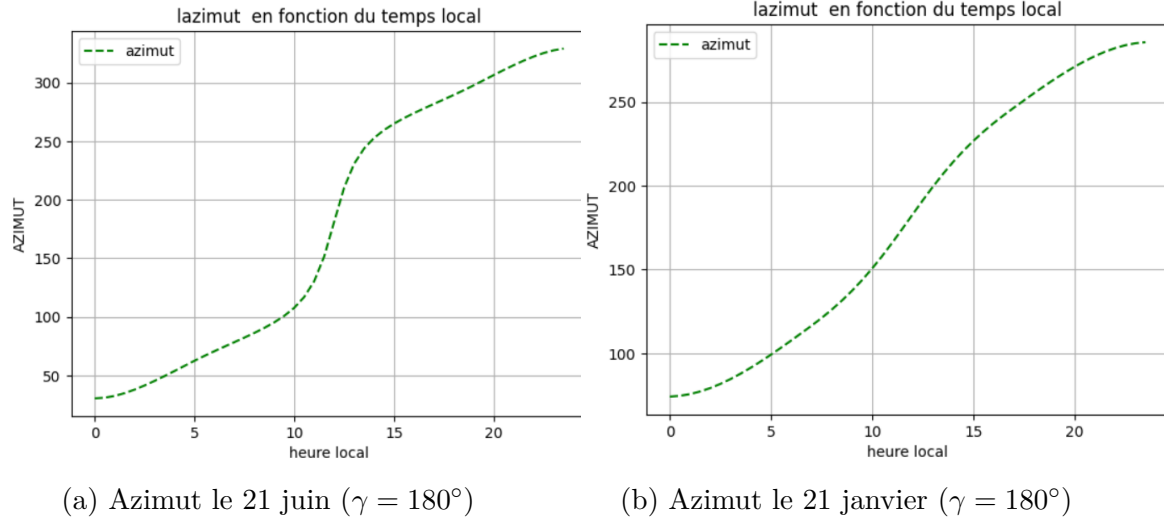


FIGURE 2.10 – Comparaison des azimuts en fonction du temps local pour différentes dates

On constate que l'azimut, le 21 juin à midi (12h), est à  $180^\circ$ . La courbe est symétrique autour du midi et la variation de l'azimut est lente, ce qui indique que la trajectoire solaire est plus longue et plus haute en été. Tandis que le 21 janvier, la variation autour de  $180^\circ$  est plus marquée et on atteint seulement  $250^\circ$  comme valeur maximale, traduisant le fait que la trajectoire en hiver est plus basse et que la durée de la journée est plus courte.

La Figure 2.11 présente les courbes d'élévation obtenues pour les deux journées du 21 juin et 21 décembre.

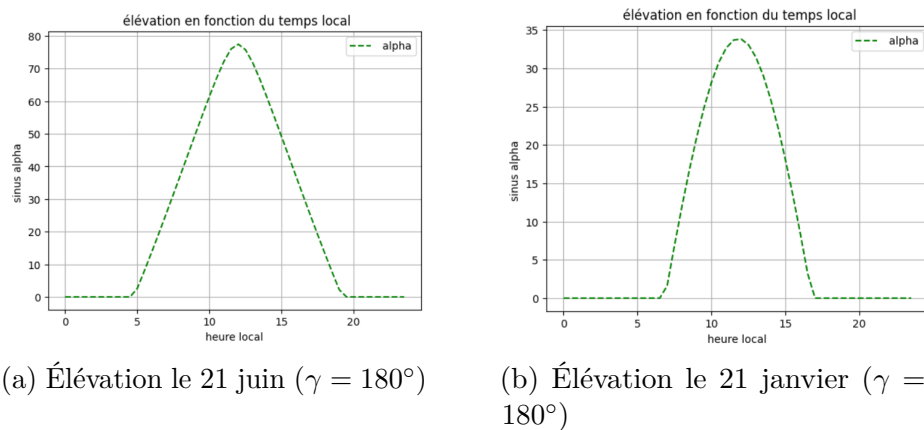
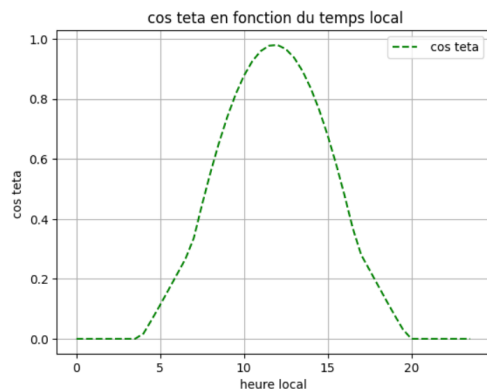


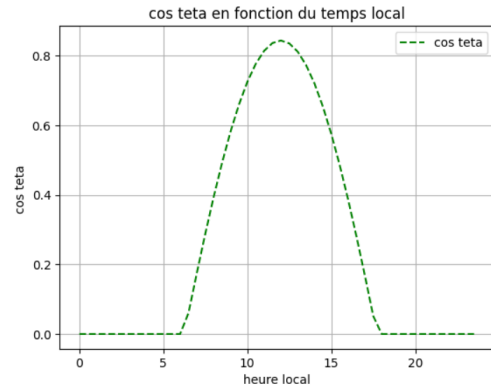
FIGURE 2.11 – Comparaison des élévations en fonction du temps local pour différentes dates

En été, le Soleil atteint son point le plus haut vers midi, avec une élévation qui atteint environ  $77^\circ$ , tandis que durant le solstice d'hiver (21 janvier), l'élévation est beaucoup plus faible, autour de  $33^\circ$ ; cette différence s'explique par l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre, qui modifie l'angle d'ensoleillement selon les saisons et, par conséquent, la durée des journées.

Après la vérification de la cohérence des résultats pour l'azimut et l'élévation, nous avons tracé les courbes de  $\cos(\theta)$  :



(a) Courbe de  $\cos(\theta)$  le 21 juin

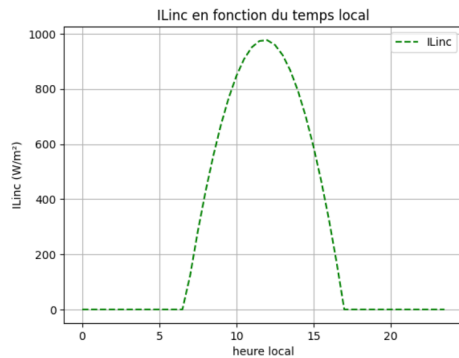


(b) Courbe de  $\cos(\theta)$  le 21 janvier

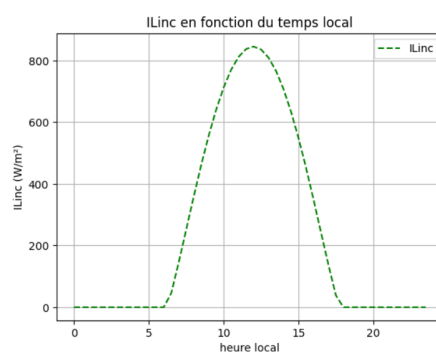
FIGURE 2.12 – Comparaison des  $\cos(\theta)$  en fonction du temps local pour différentes dates

Le 21 juin, la valeur de  $\cos(\theta)$  est élevée sur une grande partie de la journée, traduisant un bon alignement du rayonnement solaire avec la normale à la surface. Le 21 janvier,  $\cos(\theta)$  reste faible, limitant la quantité d'énergie captée.

En exploitant le code développé, nous avons tracé les courbes des intensités :



(a) Intensité le 21 juin ( $\gamma = 180^\circ$ )



(b) Intensité le 21 janvier ( $\gamma = 180^\circ$ )

FIGURE 2.13 – Comparaison des intensités en fonction du temps local pour différentes dates



L'intensité lumineuse est plus importante et étalée durant la journée du 21 juin, traduisant une meilleure captation d'énergie solaire. En hiver, le 21 janvier, l'intensité reste faible et concentrée autour de midi, impactant négativement la production solaire.

### 2.3.3 Energie annuelle récupérable pour différentes configurations

Afin de réaliser notre objectif principal, qui consiste à maximiser l'énergie annuelle récupérée par notre panneau photovoltaïque mural, nous avons analysé multiples configurations qui correspondent à différentes orientations du panneau avec et sans suiveur.

Pour chaque configuration, l'énergie annuelle récupérable est calculée pour analyser l'intérêt du dispositif suiveur et son apport.

Dans un premier lieu, nous avons traité le cas où les cellules du panneau sont inclinées de  $45^\circ$ , correspond à une configuration classique en toiture.

Les résultats sont présentés d'une manière comparative dans les deux tableaux ci-dessous :

Orientation	Plein sud ( $\gamma = 180^\circ$ )	Sud-est ( $\gamma = 135^\circ$ )	Sud-ouest ( $\gamma = 225^\circ$ )
$\beta = 90^\circ$	1397.59	1367.78	1367.17
$\beta(t)$	2679.53	2743.81	2743.25
% d'apport/au fixe	91.7%	100.45%	100.65%

TABLE 2.1 – Comparaison de la solution  $\beta(t)$  avec un panneau mural fixe ( $\beta = 90^\circ$ )

Orientation	Plein sud ( $\gamma = 180^\circ$ )	Sud-est ( $\gamma = 135^\circ$ )	Sud-ouest ( $\gamma = 225^\circ$ )
$\beta = 45^\circ$	2405.89	2227.37	2227.37
$\beta(t)$	2679.53	2743.81	2743.25
% d'apport/au fixe	11.3%	23.18%	23.11%

TABLE 2.2 – Comparaison de la solution  $\beta(t)$  avec un panneau sur un toit fixe ( $\beta = 45^\circ$ )

#### Cas mural ( $\beta = 90^\circ$ ) :

La différence entre  $\beta$  fixe et  $\beta(t)$  est significative. En orientation sud, le panneau fixe capte 1397.59 kWh contre 2679.53 kWh avec  $\beta(t)$ , soit un gain de 91.7%. Ce gain dépasse 100 % en orientation sud-est et sud-ouest. Cela s'explique par le mauvais alignement angulaire en configuration murale, qui est corrigé par le suivi.

### Cas sur toit ( $\beta = 45^\circ$ ) :

Le rendement est déjà élevé pour le fixe (ex. 2405.89 kWh en orientation sud), donc le gain relatif avec  $\beta(t)$  est bien moindre : seulement 11.3 %. En orientations sud-est et sud-ouest, le gain est un peu plus élevé ( 23 %) mais reste modeste.

### Conclusion :

Le cas suiveur ( $\beta(t)$ ) s'est révélé très avantageux, notamment en comparaison avec un panneau mural fixe ( $\beta = 90^\circ$ ), avec une amélioration nette du rendement énergétique. Bien que le gain soit moins significatif par rapport à un panneau incliné sur un toit fixe ( $\beta = 45^\circ$ ), il est important de souligner que ce dernier présente des contraintes liées à l'exposition aux facteurs environnementaux (vent, neige, grêle, etc.). Ces conditions nécessitent un entretien régulier pour garantir la sécurité et la durabilité des cellules photovoltaïques. Le système à suivi offre donc un bon compromis entre performance énergétique et sécurité.

### Remarque :

Dans le cas du suiveur solaire ( $\beta(t)$ ), un résultat inattendu a été observé. Cette anomalie pourrait être due à une erreur ou une imprécision dans le code de simulation, et mériterait une vérification approfondie.

## Chapitre 3

# Conception et intégration du dispositif suiveur

### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente la conception du dispositif suiveur qui permet l'optimisation de l'inclinaison du panneau photovoltaïque mural.

Après avoir comparé les différentes solutions de principe, la plus adaptée est développée et modélisée sous CATIA, en se focalisant sur le dimensionnement et la simplicité mécanique du système en expliquant les solutions technologiques adaptées.

### 3.2 Solutions de principe :

#### 3.2.1 Type du suiveur :

**La solution optimale à retenir** est celle intégrant un dispositif suiveur. Maintenant, nous devons décider de suivre uniquement l'élévation du soleil, donc de contrôler l'angle bêta (S1), ou de suivre selon 2 axes, donc contrôler l'angle bêta et gamma (S2).

Le choix a été effectué en tenant compte des avantages et des inconvénients des 2 solutions proposées qui sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Critère	Solution S1 : Suivi sur 1 axe ( $\beta$ )	Solution S2 : Suivi sur 2 axes ( $\beta$ et $\gamma$ )
<b>Avantages (+)</b>	+ Moins de composants et donc de liaisons cinématiques + Moins d'actionneurs + Moins lourd	+ Plus d'énergie récupérable + Meilleure orientation mécanique (suivi plus précis du soleil sur deux plans)
<b>Inconvénients (-)</b>	- Moins d'énergie récupérable	- Plus d'actionneurs - Plus de composants et de liaisons cinématiques - Plus complexe (commande, montage, maintenance)

TABLE 3.1 – Comparaison entre les deux solutions de suivi solaire

En analysant ce tableau, et afin d'établir un compromis entre performance et simplicité nous avons retenu la solution S1, maintenant nous allons présenter et étudier le développement de cette solution cinématiquement.

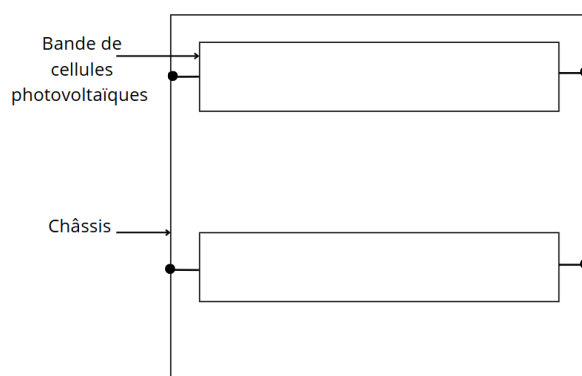


FIGURE 3.1 – Schéma global du système

Le schéma global présente un châssis rigide sur lequel sont fixées des bandes de cellules photovoltaïques. Ces bandes sont orientables grâce à un dispositif de commande de l'angle  $\beta$ , permettant d'adapter leur inclinaison en fonction de l'élévation du soleil afin d'optimiser la captation de l'énergie solaire.

### 3.2.2 Choix du dispositif de contrôle de $\beta$

Après avoir choisi la solution S1, nous avons analysé diverses solutions techniques pour concevoir le dispositif suiveur à 1 axe. Le but était d'identifier la solution la

plus efficace , tout en minimisant la complexité mécanique. Quatre options ont été étudiées :

- **Solution S11 :** Consiste à l'utilisation d'un moteur électrique pour chaque bande de cellules photovoltaïques, avec un système de transmission de mouvement comportant des réducteurs et des accouplements.

*Complexité :*

- Nombre de composants :  $n$  moteurs +  $n$  réducteurs +  $n$  éléments d'accouplement
- Nombre de liaisons :  $n$  systèmes complets indépendants

*Inconvénients :*

- Complexité de liaisons élevée (coaxialité ..)
- nécessité d'entretien d'une manière continue et consommation électrique plus élevée

Voici le schéma cinématique illustrant cette solution :

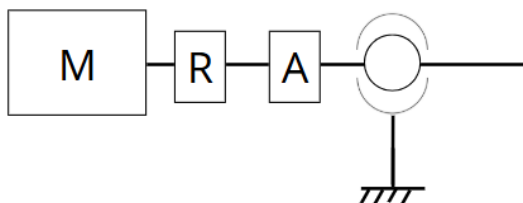


FIGURE 3.2 – Schéma cinématique de la solution avec Moteurs-accouplements

- **Solution S12 :** Consiste à utiliser un seul moteur électrique dont l'arbre est relié à une crémaillère (1), reliée à un système d'engrenages (2) pour chaque étage.

*Complexité :*

- Nombre de composants : 1 crémaillère +  $n$  pignons
- Nombre de liaisons :  $n$  pivots + 1 glissière

*Inconvénients :*

- Nous devons ajuster l'entraxe  $E$  et le module  $m$
- Problèmes de lubrification et d'étanchéité, surtout à l'extérieur

Voici le schéma cinématique illustrant cette solution :

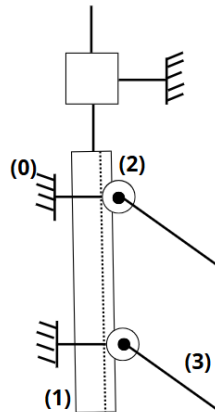


FIGURE 3.3 – Schéma cinématique de la solution avec crémaillère-pignons

- **Solution S13 :** Consiste à coupler un moteur avec un système de poulies-courroies : (1) poulies, (2) tiges, (3) courroies.

*Complexité :*

- Nombre de composants :  $n$  poulies +  $n$  tiges +  $n$  courroies
- Nombre de liaisons :  $(3n + 1)$  pivots +  $2n$  encastrements

*Inconvénients :*

- Risque de glissement, notamment en environnement extérieur (vent, pluie)

Voici le schéma cinématique illustrant cette solution :

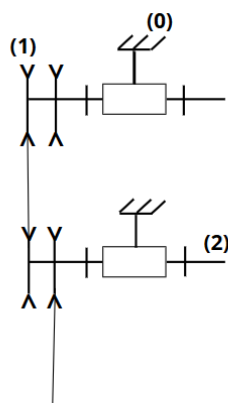


FIGURE 3.4 – Schéma cinématique de la solution avec poulies-courroies

- **Solution S14 :** Utilisation d'un vérin électrique dont la tige (1) est reliée à  $n$  biellettes (2), transmettant chacune un mouvement de rotation à une bande.

*Complexité :*

- Nombre de composants : 1 tige de vérin +  $n$  biellettes
- Nombre de liaisons : 1 glissière +  $3n$  pivots (ou pivots glissants)

*Inconvénients :*

- Nombre de liaisons élevé

Voici le schéma cinématique illustrant cette solution :

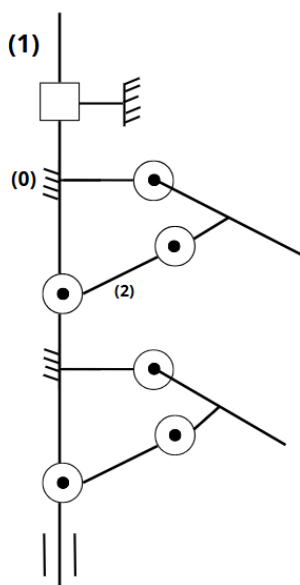


FIGURE 3.5 – Schéma cinématique de la solution avec Vérin électrique et biellettes

Après la réalisation d'une analyse comparative, nous avons retenu **la solution S14**. Elle offre un bon compromis entre simplicité mécanique, performance, fiabilité et facilité d'assemblage pour atteindre notre objectif de plus elle est bien adaptée à l'utilisation en extérieur.

### 3.3 Développement de la solution retenue

#### 3.3.1 Schéma global et dimensions du panneau

Voici le schéma global du panneau avec suiveur à 1 axe :

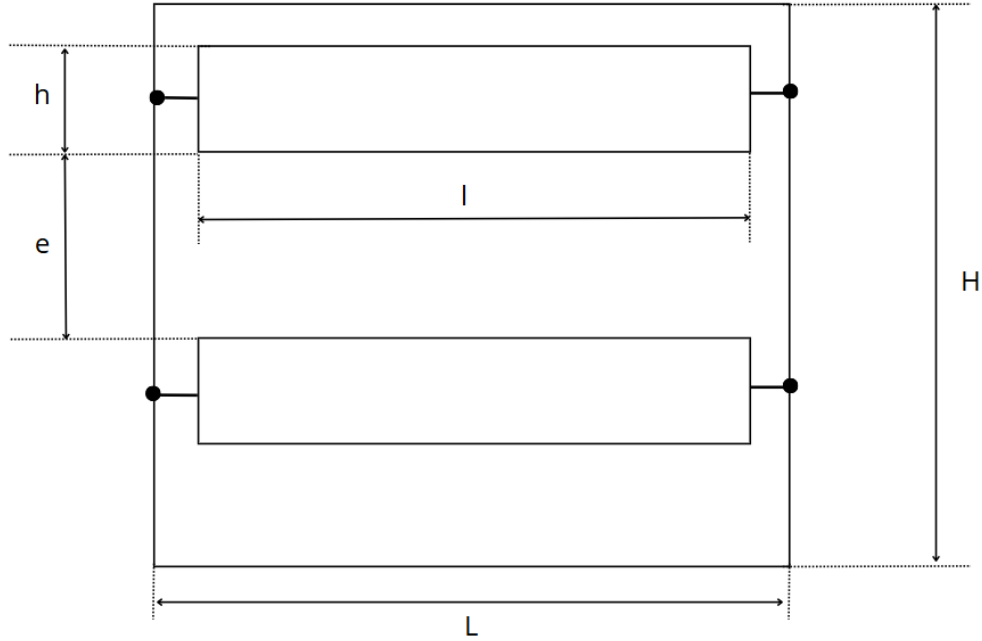


FIGURE 3.6 – Schéma global du panneau avec suiveur à 1 axe

Les dimensions principales à déterminer sont les suivantes :

- $e$  : l'écart entre les bandes
- $h$  : la hauteur des bandes
- $l$  : la longueur des bandes
- $L$  : la longueur totale du châssis
- $H$  : la hauteur totale du châssis

### 3.3.2 Calcul des dimensions globales

Pour des raisons d'encombrement, il est préférable de fixer une inclinaison maximale  $\beta_{\max}$  afin de limiter la rotation des bandes. De plus, pour réduire l'exposition des bandes aux facteurs extérieurs, nous devons choisir une distance maximale que ces dernières ne peuvent pas dépasser,  $d_{\max}$ , choisie égale à 250 mm. En se référant à la figure ci-dessus, nous obtenons les relations suivantes :

$$d_{\max} = h \cdot \sin(\beta_{\max}) \quad (3.3.1)$$

$$e + h = \frac{h}{\cos(\beta_{\max})} \quad (3.3.2)$$

D'où on tire l'expression de  $e$  :



$$e = h \left( \frac{1}{\cos(\beta_{\max})} - 1 \right) \quad (3.3.3)$$

Nous avons adopté ce calcul afin d'ajuster de manière optimale  $e$  et  $h$  d'où d'éviter tout problème d'ombrage possible entraînant une perte de rendement énergétique.

Pour dimensionner notre panneau mural avec suiveur, nous allons considérer comme référence une installation domestique type avec :

- une puissance installée de 1 kWc,
- une orientation plein sud avec un angle  $\beta = 45^\circ$ ,
- des cellules photovoltaïques ayant une production de 0,2 kWc/m<sup>2</sup> (soit un rendement de l'ordre de 17%).

La surface de cette installation de référence est donc :

$$S_{\text{ref}} = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ m}^2$$

L'énergie récupérée sur une année par cette installation est donnée par :

$$E_{\text{récupérée,ref}} = E_{\text{récupérable}} \times \text{rendement} \times S_{\text{ref}} = 2400 \times 0,17 \times 5 = 2040 \text{ kWh}$$

Pour que notre panneau mural avec suiveur puisse récupérer la même quantité d'énergie sur une année, la superficie de ses cellules doit vérifier :

$$E_{\text{récupérée,ref}} = E_{\text{récupérable,mural,suiveur}} \times \text{rendement} \times S_{\text{suiveur}}$$

D'où :

$$S_{\text{suiveur}} = \frac{E_{\text{récupérée,ref}}}{E_{\text{récupérable,mural,suiveur}} \times \text{rendement}} = \frac{2040}{2700 \times 0,17} \approx 4,44 \text{ m}^2$$

Si l'on devait assurer cette même production avec un panneau mural classique (incliné à  $\beta = 90^\circ$ ), la superficie des cellules serait :

$$S_{\text{mural,fixe}} = \frac{2040}{1400 \times 0,17} \approx 8,6 \text{ m}^2$$

### Conclusion comparative

- Un système avec suiveur permet de réduire la surface de cellules à environ 4.4 m<sup>2</sup> au lieu de 8.6 m<sup>2</sup> : soit presque une division par 2.
- Par rapport à une toiture inclinée fixe à 45°, le gain n'est pas significatif (0.5 m<sup>2</sup>), donc le suiveur est plus intéressant pour une installation plane.

### Choix des dimensions finales

À partir du calcul effectué précédemment, et dans le but de choisir  $\beta$  qui nous donne le maximum d'énergie récupérable tout en respectant le critère d'encombrement, nous déduisons que la surface des cellules photovoltaïques est située dans l'intervalle suivant :

$$S_{\text{cellules}} \in [4.4, 5] m^2$$

Retenons, dans ce qui suit,  $d_{\text{max}} = 250, \text{ mm}$  :

Cas d'une inclinaison fixée à  $\beta = 45^\circ$

$$h = \frac{250}{\sin(45^\circ)} \approx 353 \text{ mm}$$

$$e = 353 * \left( \frac{1}{\cos(45^\circ)} - 1 \right) \approx 146 \text{ mm}$$

Dans ce cas  $\theta = 30^\circ$  , nous obtenons  $\cos(\theta_{\text{max}})$  est égale à 0,88

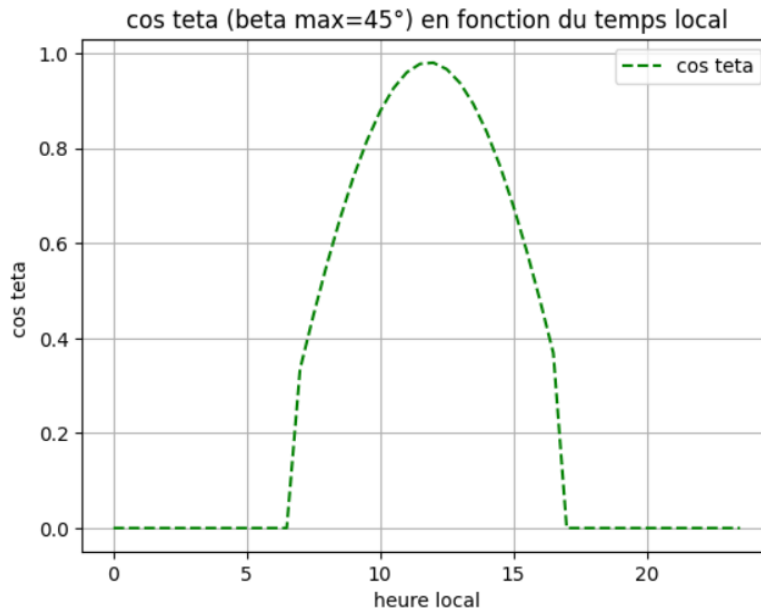


FIGURE 3.7 – Courbe représentative de  $\cos(\theta)$  dans le cas où  $\beta = 45^\circ$

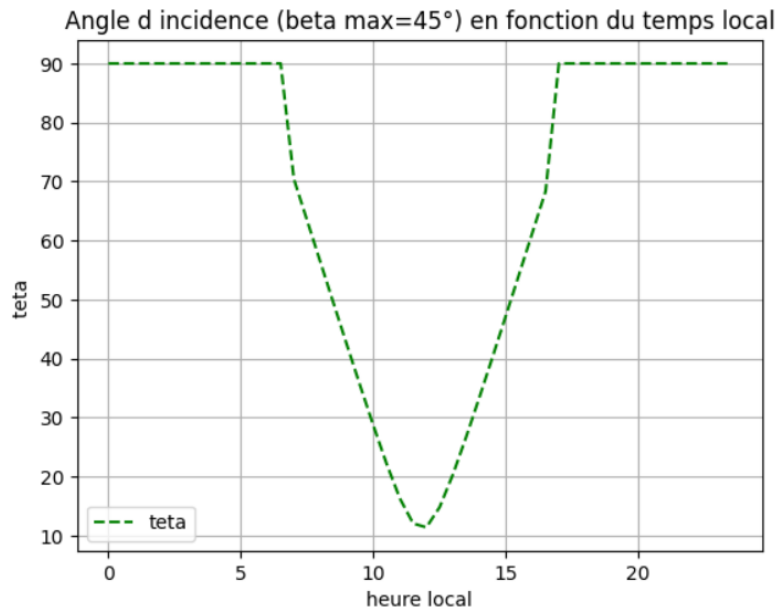


FIGURE 3.8 – Courbe représentative de l'Angle d'incidence dans le cas où  $\beta = 45^\circ$

Cas d'une inclinaison fixée à  $\beta = 50^\circ$

$$h = \frac{250}{\sin(50^\circ)} \approx 326 \text{ mm}$$

$$e = 326 * \left( \frac{1}{\cos(50^\circ)} - 1 \right) \approx 196 \text{ mm}$$

Lorsque  $\theta = 25^\circ$ , la valeur de  $\cos(\theta_{\max})$  est égale à 0,9

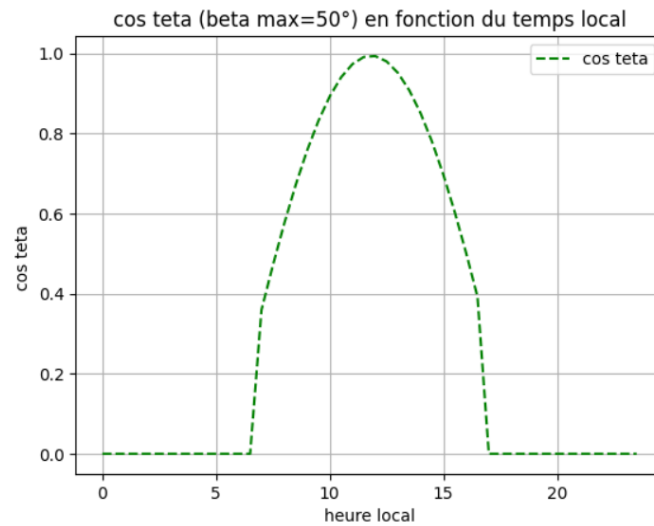


FIGURE 3.9 – Courbe représentative de  $\cos(\theta)$  dans le cas où  $\beta = 50^\circ$

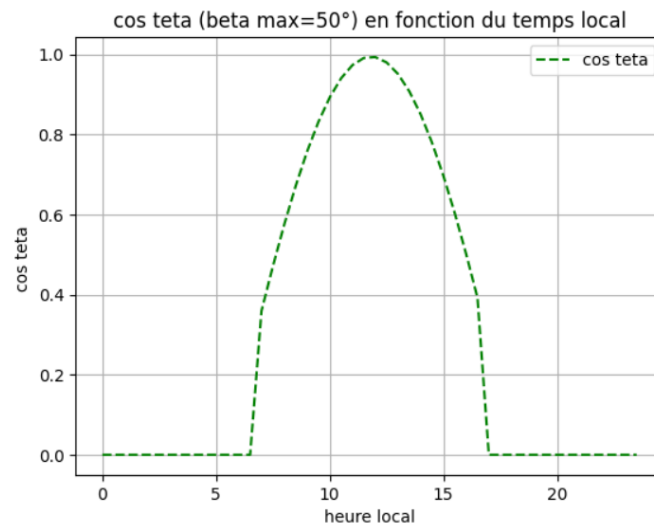


FIGURE 3.10 – Courbe représentative de l'Angle d'incidence dans le cas où  $\beta = 50^\circ$

À partir des résultats tirés et en analysant les deux cas, nous avons choisi d'accorder la priorité au critère d'encombrement, puisque le gain en énergie annuelle récupérable n'est pas important.

De ce fait l'angle maximal d'inclinaison par rapport au sol choisi est  $\beta_{max} = 45^\circ$ .

### 3.3.3 Dimensionnement du dispositif de transformation de mouvement

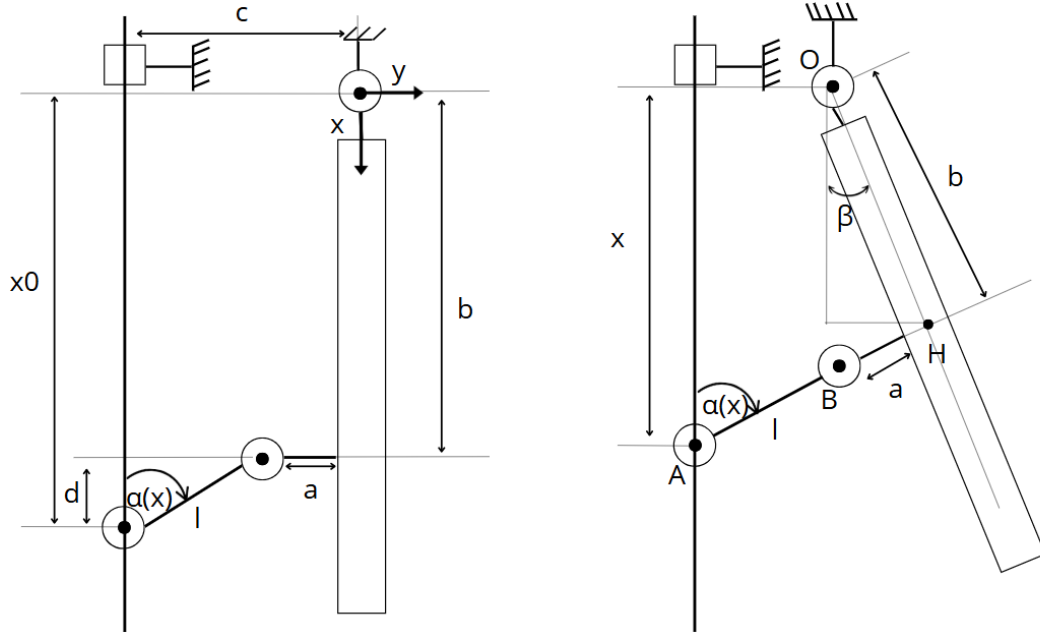


FIGURE 3.11 – Calcul des paramètres du panneau en fonction du déplacement  $x$

Dans le but de déterminer  $\alpha(x)$  : l'angle de rotation que la bielle peut effectuer et  $\beta(x)$  avec  $x$  : le déplacement et en exploitant la relation de Chasles, nous obtenons :

$$\overrightarrow{OH} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BH}$$

Avec :

$$\overrightarrow{OA} = \begin{pmatrix} x \\ -c \end{pmatrix} ; \quad \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} -l \cos \alpha \\ l \sin \alpha \end{pmatrix} ; \quad \overrightarrow{BH} = \begin{pmatrix} -a \sin \beta \\ a \cos \beta \end{pmatrix} ; \quad \overrightarrow{OH} = \begin{pmatrix} b \cos \beta \\ b \sin \beta \end{pmatrix}$$

Donc, en sommant :

$$\overrightarrow{OH} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BH}$$

Cela donne :

$$\begin{pmatrix} b \cos \beta \\ b \sin \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - l \cos \alpha - a \sin \beta \\ -c + l \sin \alpha + a \cos \beta \end{pmatrix}$$

Donc, le système :

$$(1) \quad b \cos \beta = x - l \cos \alpha - a \sin \beta$$

$$(2) \quad b \sin \beta = -c + l \sin \alpha + a \cos \beta$$

Afin de résoudre ce système obtenu on commence par l'isolation des termes trigonométriques. À partir de la première équation, on obtient :

$$a \sin \beta + b \cos \beta = x - l \cos \alpha$$

et à partir de la deuxième :

$$-a \cos \beta + b \sin \beta = -c + l \sin \alpha$$

On exprime maintenant les fonctions trigonométriques. On isole  $\sin \beta$  à partir de la première relation :

$$\sin \beta = \frac{x - l \cos \alpha - b \cos \beta}{a}$$

et  $\cos \beta$  à partir de la deuxième :

$$\cos \beta = \frac{c - l \sin \alpha + b \sin \beta}{a}$$

On effectue une substitution de  $\sin \beta$  dans l'expression de  $\cos \beta$  :

$$\cos \beta = \frac{c - l \sin \alpha + b \left( \frac{x - l \cos \alpha - b \cos \beta}{a} \right)}{a}$$

ce qui donne, après simplification :

$$\cos \beta = \frac{a(c - l \sin \alpha) + b(x - l \cos \alpha) - b^2 \cos \beta}{a^2}$$

En regroupant les termes :

$$a^2 \cos \beta + b^2 \cos \beta = a(c - l \sin \alpha) + b(x - l \cos \alpha)$$

ce qui conduit à l'expression suivante :

$$\cos \beta = \frac{b(x - l \cos \alpha) + a(c - l \sin \alpha)}{a^2 + b^2}$$

La valeur de  $\beta$  s'obtient alors par :

$$\beta = \arccos \left( \frac{b(x - l \cos \alpha) + a(c - l \sin \alpha)}{a^2 + b^2} \right)$$

Enfin, on peut aussi exprimer  $\sin \beta$  de manière équivalente :

$$\sin \beta = \frac{a(x - l \cos \alpha) - b(c - l \sin \alpha)}{a^2 + b^2}$$

On peut maintenant dimensionner la longueur des plaques de biellettes en écrivant  $l$  en fonction des autres paramètres qu'on va fixer :

$$l = \frac{bx + ac - \cos \beta (a^2 + b^2)}{b \cos \alpha + a \sin \alpha}$$

On prend :

$$\begin{aligned} a &= 50 \text{ mm} \\ b &= 186 \cos(\beta_{\max}) \\ x &= 306 \text{ mm} \\ x_0 &= 125,14 \text{ mm} \\ c &= 227 \text{ mm} \\ \alpha &= 78.658^\circ \\ \beta_{\max} &= 45^\circ \end{aligned}$$

En substituant dans l'équation précédente on trouve  $l \sim 290 \text{ mm}$ .

Le choix de  $C$  est pris de telle sorte on prend en considération l'encombrement de notre panneau et donc on a minimiser le maximum la valeur de  $C$  tout en respectant l'inclinaison des bandes de cellules.

### 3.4 Conception sur CATIA V5

Le but de cette partie consiste à expliquer le mécanisme de la solution retenue et les solution technologiques envisagées d'une manière généralisée et adaptable pour des différentes dimensions ,dans une étape plus avancée on peut faire une conception complète avec un calcul et un dimensionnement plus détaillés afin de choisir les bons actionneurs.

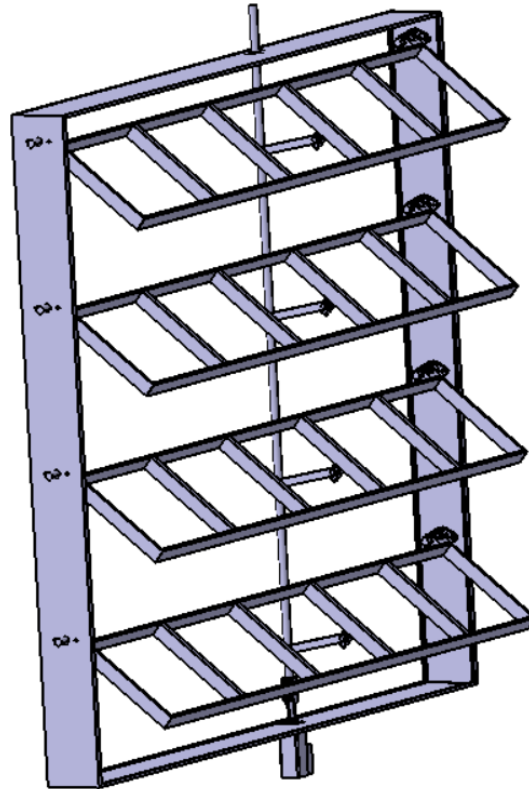


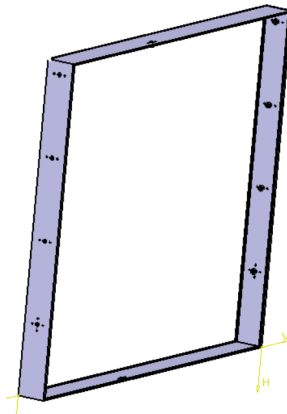
FIGURE 3.12 – Solution en CATIA

### 3.4.1 Description des composants principaux

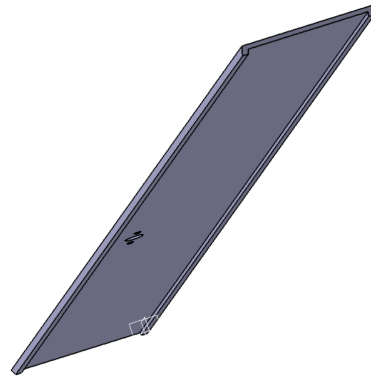
#### Châssis :

Pour réduire le poids du panneau on a opté pour un châssis qui est sous forme de 4 profilés en "U" avec un chanfrein à l'extrémité soudés entre eux comme il est indiqué dans les deux figures suivantes :





(a) châssis

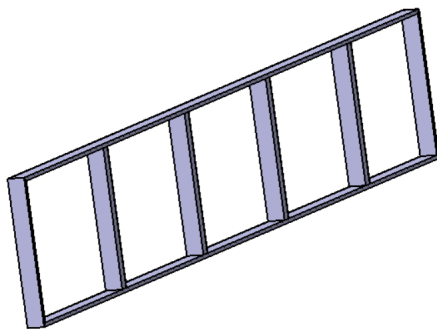


(b) profilé en U

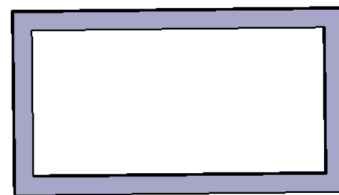
FIGURE 3.13 – châssis

### Support :

Lors de la conception du support on doit assurer à la fois la résistance à la charge de flexion et la légèreté du composant pour faciliter le maintien des cellules et leur rotation, pour ce faire on a opté pour une configuration qui consiste à souder des tubes rectangulaires entre eux comme le montrent ces deux figures :



(a) support assemblé



(b) tube rectangulaire

FIGURE 3.14 – Support

### Paliers à rotules :

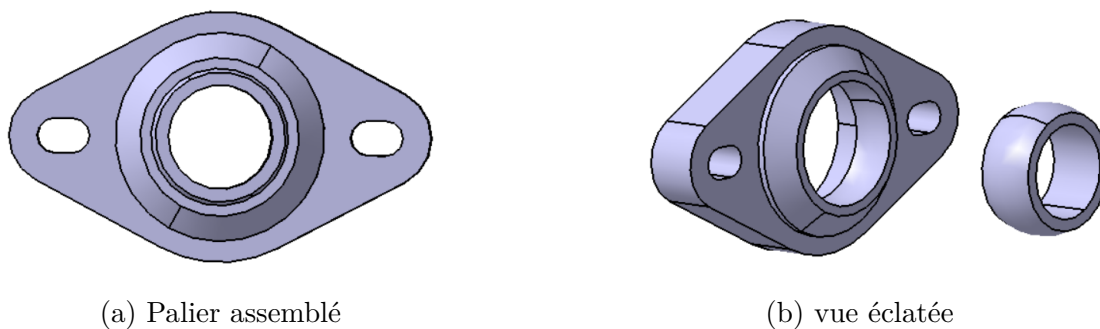


FIGURE 3.15 – Palier à rotule

Les paliers à rotule constituent une solution fiable ,en effet, ils offrent un fonctionnement silencieux avec un entretien minimal tout en assurant des performances idéales dans un environnement extérieur puisqu'ils sont résistants à la corrosion. on trouve ci dessous d'autres spécifications sur les paliers utilisées dans notre solution :

matériau	plastique
diamètre d'arbre	25mm
charge radiale statique	3000N
charge axiale statique	1500N
Angle de rotation	15°
poids	58.5g
intervalle de température	[-30°C ;80°C]

TABLE 3.2 – Caractéristiques des paliers [10].

vérin électrique :

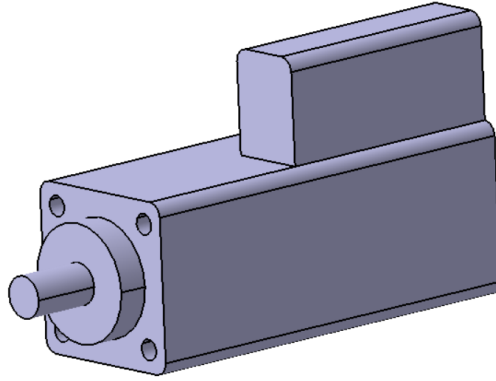
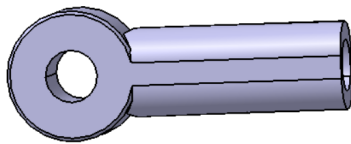
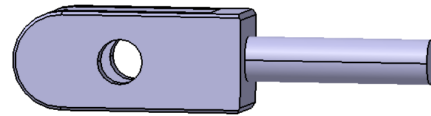


FIGURE 3.16 – Vérin électrique

Le choix du vérin est basé dans notre cas sur la course nécessaire, selon notre conception, on a choisi un vérin de référence "ESBF-BS-63-300-10P" ce vérin est caractérisé par une course de 300 mm et une force d'avance de 7000N [11] [12].



(a) Embout à rotule



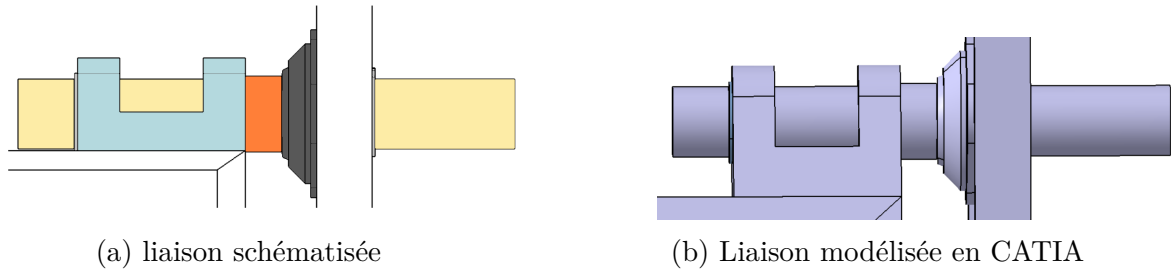
(b) Fourchette filetée

FIGURE 3.17 – fourchette filetée et embout à rotule

### 3.4.2 Solutions technologiques

Afin d'assurer la rotation du support par rapport au châssis, notre solution consiste à associer une liaison linéaire annulaire et une rotule des deux cotés :

**Liaison linéaire annulaire :** cette liaison est assurée par un arrêt axial de l'arbre par rapport à la chape par l'intermédiaire d'un criclip et une entretoise avec un arrêt en translation aussi prévu entre le châssis et l'arbre, cette solution est schématisée dans les figures ci-dessous :

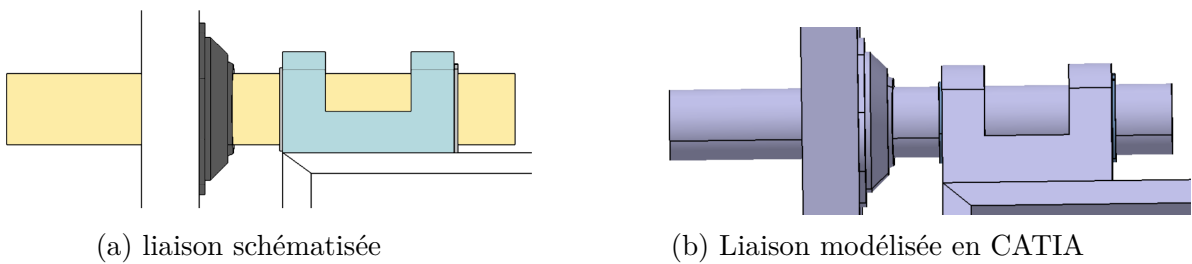


(a) liaison schématisée

(b) Liaison modélisée en CATIA

FIGURE 3.18 – Liaison linéaire annulaire

**Liaison rotule :** il suffit de prévoir un arrêt axial de part et d'autre de la chape et laisser l'extrémité de l'arbre libre puisqu'on dispose des paliers à rotule cette liaison est détaillée dans les deux figures suivantes :



(a) liaison schématisée

(b) Liaison modélisée en CATIA

FIGURE 3.19 – Liaison rotule

**Remarque :** Nous avons pris en compte dans cette solution l'effet de la dilatation de l'arbre par la température et par suite on a prévu un jeu entre l'entretoise et le palier comme indiqué dans la figure suivante .

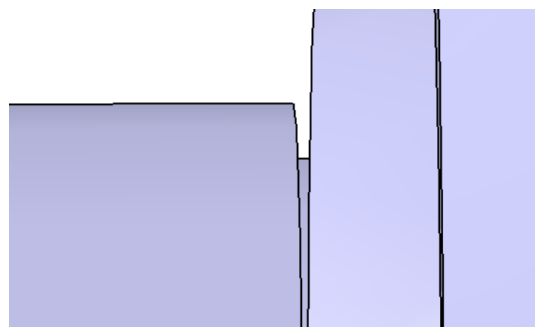
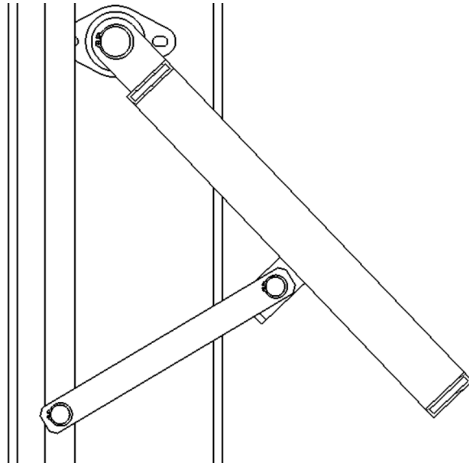


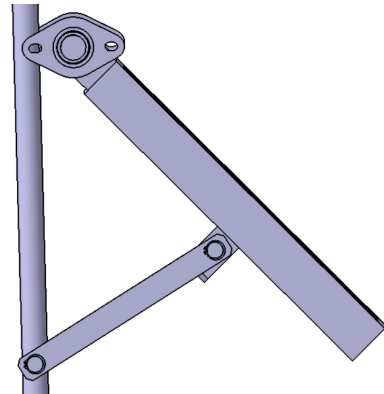
FIGURE 3.20 – jeu fonctionnel

Le mécanisme de notre dispositif consiste à transformer le mouvement de translation de la tige en une rotation du support, la solution envisagée est l'ensemble

de deux articulations en introduisant un axe entre la tige et deux plaques de biellette arrêté axialement par deux circlips comme le montrent les figures suivantes :



(a) mécanisme schématisé



(b) mécanisme modélisé en CATIA

FIGURE 3.21 – Mécanisme de la solution

La translation de la tige aussi doit être guidée et par suite nous visons à ce que son mouvement soit glissant par rapport au châssis ceci est fait par la présence d'un paliers à rotule fixé à la partie supérieure du châssis avec un ensemble assurant la translation de la tige

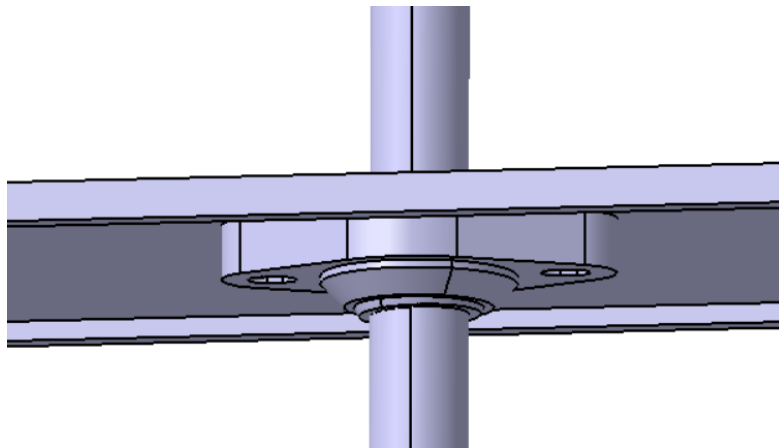


FIGURE 3.22 – guidage en translation

La translation de la tige se fait à partir d'un ensemble composé du vérin, un embout à rotule et une fourche filetée ces 3 composants sont liés entre eux comme le montre la Figure suivante [13] [14] [15] :

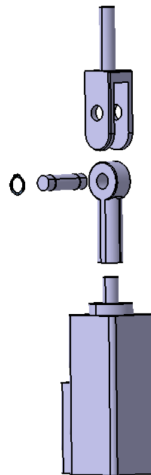
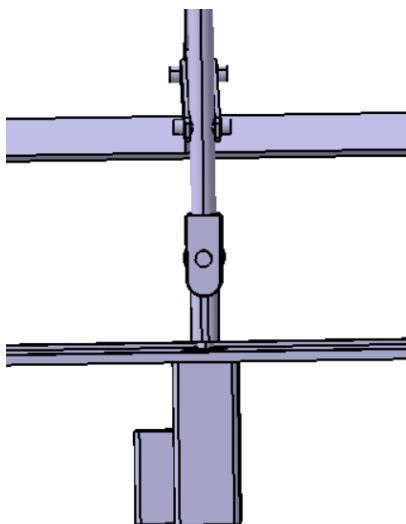
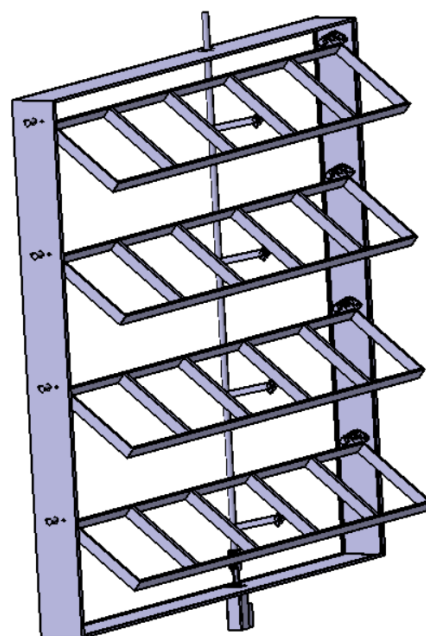


FIGURE 3.23 – vue éclatée de l'ensemble

A l'état initial les bandes ne sont pas inclinées , le vérin est par suite actif avec une course de 205mm alors que le maximum d'inclinaison des bandes est atteint lorsque le vérin est à son état initial ces figures montrent la relation entre l'inclinaison des bandes et la course du vérin :

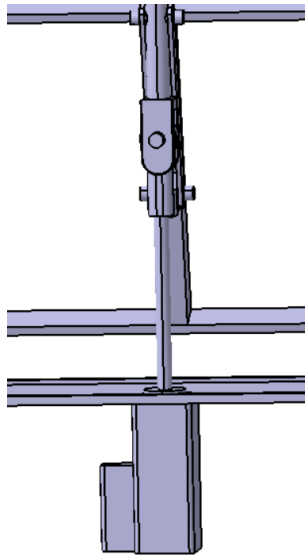


(a) Position du vérin

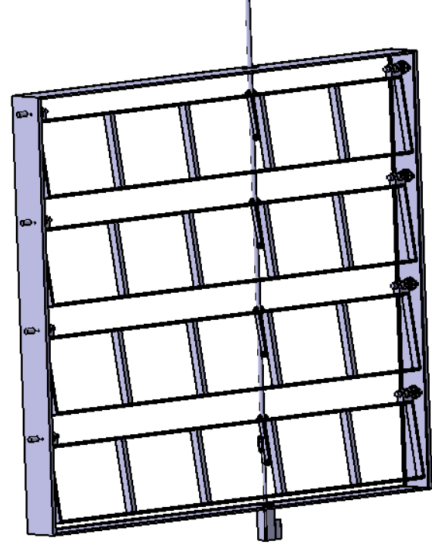


(b) Inclinaison maximale des bandes

FIGURE 3.24 – Panneau au cours de la journée



(a) Position du vérin



(b) Position initiale des bandes

FIGURE 3.25 – Panneau au repos

## Conclusion générale

Ce projet de fin d'année nous a permis d'optimiser la captation de l'énergie solaire en utilisant un système photovoltaïque mural innovant qui intègre un dispositif suiveur que nous avons développé. Face aux limites des panneaux muraux fixes, notamment en termes de rendement, nous avons proposé une solution permettant d'ajuster dynamiquement l'angle d'inclinaison du panneau selon l'élévation du soleil.

Nous avons d'abord établi un modèle analytique, puis développé une simulation numérique en Python pour évaluer l'énergie récupérable selon différentes configurations. Ces analyses ont montré l'intérêt d'un suivi à un axe, qui offre un bon compromis entre performance énergétique et simplicité mécanique.

La solution retenue, utilisant un vérin électrique et un système de biellettes, a été modélisée en détail sur CATIA V5, avec une attention particulière portée au dimensionnement, aux contraintes d'encombrement et aux conditions extérieures. Les résultats ont montré un gain significatif en énergie par rapport à une installation murale fixe, prouvant la pertinence de notre approche.

Ce travail constitue une contribution concrète à l'amélioration des systèmes solaires, en combinant efficacité énergétique, faisabilité mécanique et intégration architecturale.



## Annexe

### Code Python

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import fminbound

def calcul_numero_jour(mois, jours):
    days_in_month = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31,
                     30, 31]
    return sum(days_in_month[:mois-1]) + jours

def calcul_angle_B(Nj):
    B = np.radians(0.98563 * (Nj - 173))
    return B

def equation_du_temps(Nj):
    x = 360 * (Nj - 1) / 365.242
    EOT = (0.258 * np.cos(np.radians(x))
           - 7.416 * np.sin(np.radians(x))
           - 3.648 * np.cos(2 * np.radians(x))
           - 9.228 * np.sin(2 * np.radians(x)))
    return EOT

def calcul_TSV(heures, longitude_locale, longitude_fuseau,
               EOT):
    LC = (longitude_locale - longitude_fuseau) / 15
    TSV = heures - (EOT / 60) + LC
    return TSV

def calcul_angle_horaire(TSV):
    w = np.radians(15 * (TSV - 12))
    return w

def calcul_declinaison(B):
```

```

decl = np.arcsin(0.39795 * np.cos(B))
return decl

def calcul_elevation(decl, latitude_locale, w):
    alpha = np.arcsin(np.sin(decl) * np.sin(latitude_locale)
        +
            np.cos(decl) * np.cos(latitude_locale)
            * np.cos(w))
    alpha = np.where(alpha < 0, 0, alpha)
    return alpha

def calcul_azimut(w, decl, alpha, latitude_locale):
    A = np.zeros(len(w))
    A1 = np.zeros(len(w))
    for i in range(len(w)):
        A[i] = np.arccos((np.sin(decl) * np.cos(
            latitude_locale) -
                np.cos(decl) * np.cos(w[i]) * np.
                    sin(latitude_locale)) /
                    (np.cos(alpha[i])))
        if np.sin(w[i]) >= 0:
            A1[i] = 2 * np.pi - A[i]
        else:
            A1[i] = A[i]
    return A1

def calcul_A_he(y):
    return np.sin(np.radians((360 / 365) * (y - 121)))

def calcul_T0(latitude_locale, A_he, z, alpha):
    alpha = np.array(alpha)
    t00 = 2.4 - 0.9 * np.sin(latitude_locale) + 0.1 * (2 +
        np.sin(latitude_locale)) * A_he - 0.2 * z - (1.22 +
        0.14 * A_he) * (1 - np.sin(alpha))
    return t00

def calcul_T1(z):
    return (0.89) ** z

def calcul_T2(A_he, z):
    return (0.9 + 0.4 * A_he) * (0.63) ** z

def _cos_teta(alpha, beta, gamma, A):

```

```

    valeur = np.sin(alpha) * np.cos(beta) + np.cos(alpha) *
        np.sin(beta) * np.cos(gamma - A)
    return np.maximum(valeur, 0)

def calcul_ILi(I_0, Tl, z, alpha):
    alpha = np.array(alpha)
    IL = np.zeros(np.shape(alpha))
    termeexpo = np.zeros(np.shape(alpha))
    x = np.zeros(np.shape(alpha))
    for j in range(len(w)):
        if alpha[j] == 0:
            IL[j] = 0
        else:
            x[j] = (9.4 * np.sin(alpha[j])) / (0.89 ** z)
            termeexpo[j] = np.exp(-Tl[j] * (1 / (0.9 + x[j]))
            IL[j] = I_0 * termeexpo[j]
    return IL

def _ILinc(ILi, cos_teta):
    ILinc = ILi * cos_teta
    ILinc = np.where(ILinc <= 0, 0, ILinc)
    return ILinc

def integrale_ILi_trapz(heures, ILinc):
    return np.trapezoid(ILinc, heures)

def calcul_energie_annuelle(latitude_locale,
    longitude_locale, longitude_fuseau, z, I_0, gamma, m):
    energie_totale = 0
    days_in_month = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31,
        30, 31]
    for month in range(1, 13):
        for day in range(1, days_in_month[month-1] + 1):
            y1 = calcul_numero_jour(month, day)
            heuress = np.arange(0, 24, 0.5)
            EOT1 = equation_du_temps(y1)
            TSV1 = calcul_TSV(heuress, longitude_locale,
                longitude_fuseau, EOT1)
            w1 = calcul_angle_horaire(TSV1)
            decl1 = calcul_declinaison(calcul_angle_B(y1))
            alphai = calcul_elevation(decl1, latitude_locale
                , w1)

```

```
A1 = calcul_azimut(w1, decl1, alphai,
    latitude_locale)
A_he1 = calcul_A_he(y1)
T00 = calcul_T0(latitude_locale, A_he1, z,
    alphai)
T10 = calcul_T1(z)
T20 = calcul_T2(A_he1, z)
Tl0 = T00 + T10 + T20
ILi1 = calcul_ILi(I_0, Tl0, z, alphai)
if m == 0:
    beta = np.full_like(alphai, np.pi / 4)
else:
    beta = max_beta(alphai, gamma, A1)
    cos_teta_ = _cos_teta(alphai, beta, gamma, A1)
    ILinc0 = _ILinc(ILi1, cos_teta_)
    daily_energy = np.trapezoid(ILinc0, heuress)
    energie_totale += daily_energy
return energie_totale / 1000

def max_beta(alpha, gamma, A):
    beta = np.zeros(len(alpha))
    for i in range(len(alpha)):
        beta[i] = np.arctan2(np.cos(alpha[i]) * np.cos(gamma
            - A[i]), np.sin(alpha[i]))
        beta[i] = np.clip(beta[i], 0, np.radians(180))
        if alpha[i] == 0:
            beta[i] = 0
    return beta
```

## Bibliographie

- [1] Statistiques de la situation actuelle en tunisie, 2025 [http://www.tunisieindustrie.gov.tn/upload/ENR/Guide\\_detaille\\_ENR\\_tunisie\\_mai2019.pdf](http://www.tunisieindustrie.gov.tn/upload/ENR/Guide_detaille_ENR_tunisie_mai2019.pdf) consulté le 10/01/2025
- [2] Structure et fonctionnement d'une cellule PV [https://www.researchgate.net/publication/330456824\\_Operation\\_and\\_physics\\_of\\_photovoltaic\\_solar\\_cells\\_an\\_overview](https://www.researchgate.net/publication/330456824_Operation_and_physics_of_photovoltaic_solar_cells_an_overview) consulté le 15/01/2025
- [3] Structure d'une cellule PV <https://www.lumensol.fr/lumensol-solaire-photovoltaique-donnees-techniques.html> consulté le 15/01/2025
- [4] Effet photovoltaïque sur une cellule PV <https://www.annabac.com/revision-bac/le-photovoltaique-pour-capter-l-energie-solaire> consulté le 20/01/2025
- [5] Power From The Sun de William B. Stine et Michael Geyer <http://powerfromthesun.net/book.html> consulté le 20/01/2025
- [6] Les orbites de la Terre en relation avec le Soleil [https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbite\\_de\\_la\\_Terre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbite_de_la_Terre) consulté le 28/01/2025
- [7] Modèle de Capderou Kasten [https://www.cder.dz/download/Art2-2\\_1.pdf](https://www.cder.dz/download/Art2-2_1.pdf) consulté le 02/02/2025
- [8] Les différents types de rayonnement solaire [https://www.researchgate.net/publication/285322379\\_Modelisation\\_des\\_parametres\\_de\\_la\\_conversion\\_thermique\\_de\\_l'energie\\_solaire](https://www.researchgate.net/publication/285322379_Modelisation_des_parametres_de_la_conversion_thermique_de_l'energie_solaire) consulté le 02/02/2025
- [9] Les différents types de rayonnement solaire [https://www.researchgate.net/publication/285322379\\_Modelisation\\_des\\_parametres\\_de\\_la\\_conversion\\_thermique\\_de\\_l'energie\\_solaire](https://www.researchgate.net/publication/285322379_Modelisation_des_parametres_de_la_conversion_thermique_de_l'energie_solaire) consulté le 02/02/2025
- [10] Caractéristiques des paliers <https://maedlernorthamerica.com/partshop/flange-block-bearing-igus-igubal-efom-25-2-mounting-holes-bore-25mm-pn-6215512>

- [11] Vérin électrique <https://www.festo.com/in/en/a/download-document/datasheet/574098>
- [12] Vérin électrique [https://www.festo.com/media/catalog/203032\\_documentation.pdf](https://www.festo.com/media/catalog/203032_documentation.pdf)
- [13] Fourchette fileté <https://www.festo.com/in/en/a/download-document/datasheet/10768>
- [14] Embout à rotule <https://www.festo.com/in/en/a/download-document/datasheet/9263>
- [15] Guide d'assemblage de l'ensemble [https://www.festo.com/media/catalog/203517\\_documentation.pdf](https://www.festo.com/media/catalog/203517_documentation.pdf)