



Etude mécanique d'un concentrateur solaire parabolique

Safa SKOURI, Salwa BOUADILA, Sassi Ben Nassrallah

¹Laboratoire des Procédés Thermiques, Centre de Recherche et des Technologies de l'Energie de Borj-Cedria, BP 95 Hammam Lif 2050, Tunisie.

²Département énergétique, Ecole nationale d'ingénieurs de Monastir, ENIM, Rue Ibn El Jazzar, 5019 Monastir, Tunisie.

Skouri_safa@yahoo.fr

Résumé - Dans ce travail nous décrivons un prototype de système de concentration solaire ponctuelle qui est un concentrateur solaire parabolique conçu et réalisé au sein du centre de recherches et des technologies de l'énergie (CRTE). Ce type de concentrateur mérite un système de poursuite solaire automatique et performant. Ceci nécessite en premier lieu une étude mécanique approfondie du système solaire (cinématique, statique et dynamique). En tenant en compte des actions mécaniques appliquées de l'extérieur sur le système solaire et des liaisons mécaniques entre les différents composants du système nous allons aboutir à la détermination des couples des moteurs du pilotage de l'axe azimut et celle du pilotage de l'axe d'élévation. L'obtention des couples moteurs du CSP va nous aider à distinguer les moteurs électriques et les réducteurs de vitesse adaptables avec ces couples moteurs ensuite elle va nous assister à choisir les moteurs les plus convenables et les moins coûteux pour notre mécanisme.

Mots Clés : Etude mécanique, couple moteur, réducteur de vitesse.

Introduction

La concentration solaire est actuellement utilisée pour des installations pilotes de type industriel comme source chaude pour des cycles thermodynamiques pour produire de l'électricité, de l'hydrogène ou dans des réacteurs chimiques (entre 450 et 3000 °C) ou encore pour augmenter la production de cellules photovoltaïques [1]. Il est donc pertinent d'envisager que ces technologies contribueront à moyen ou à long terme à offrir une véritable alternative à la consommation de ressources fossiles. Rafeeu et al [2] ont fait une étude comparative de la performance de trois concentrateurs solaires paraboliques dans les conditions climatiques de Malaysia en jouant sur différents paramètres optique et géométrique ainsi que la distance focale, le diamètre d'ouverture, le matériau du réflecte. Dans les dernières décennies une étude expérimentale d'un cuiseur solaire de type boîte en utilisant un concentrateur fixe a été fait par Negi et al [3], il a montré que ce dispositif peut offrir une meilleure collecte de la chaleur et une cuisson plus efficace. Une étude expérimentale a été faite de cuiseur solaire sphérique avec système de poursuite solaire. Ils ont montré que la température à l'intérieur de la cuve a atteint plus de 93°C [4]. Lokeswaran et al. [5] ont fait une comparaison expérimentale de la performance thermique, du rendement optique, du facteur de pertes de chaleur et la puissance de cuisson de cuisinières solaires paraboliques pour les deux cas avec et sans milieu poreux.

Le rayonnement diffus est très peu utilisé dans les systèmes à forte concentrations, seul le rayonnement direct est concentré. Les systèmes à forte concentration ont un champ étroit [6]. Il est donc nécessaire de pointer pour capter le rayonnement direct par des mécanismes d'orientation. Les systèmes à forte concentration nécessitent des montages optiques précis et donc chers. Dans ce travail nous avons décrit un prototype de système de captation solaire qui est un concentrateur solaire parabolique conçu et réalisé dans le CRTE. Ce type de

concentrateur nécessite un mécanisme de poursuite solaire automatique. Il faut donc choisir les moteurs électriques convenables pour notre mécanisme. Dans ce chapitre nous avons fait une étude mécanique et cinématique du système pour aboutir au choix des moteurs.

1. Description et repérage du mécanisme

Afin de choisir les moteurs convenable pour pivoter le concentrateur solaire, nous devons tout d'abord déterminer les couples des moteurs capable de déplacer ce CSP.

L'objectif de cette partie est de déterminer les paramètres intervenant dans le pilotage de l'axe de rotation du site (l'angle d'élévation) et de déterminer l'expression du couple du moteur de pilotage de l'axe azimut. Ceci nécessite une étude mécanique approfondie du CSP (cinématique, statique, cinétique et dynamique).

Le mécanisme est constitué principalement par une parabole (1), un absorbeur (2) placé à la position focale, un réflecteur (3) encastré à une nacelle (4), un contre poids (5), un support (6) supportée par un pylône (7) et un bâti (8) fixé au sol. Ce mécanisme présente deux degrés de liberté de rotation : un horizontal pour régler l'angle azimut et un autre vertical pour l'angle d'élévation.

Pour simplifier l'étude, le système est modélisé par trois éléments : le pylône (7), l'arbre de rotation azimut 1 et l'ensemble 2 comprenant la parabole (1) fixée sur l'axe (I, \vec{z}) et le contre poids (5) fixé sur la parabole en B , il est en liaison glissière d'axe (B, \vec{z}) .

Le système possède deux mouvements indépendants pour orienter la parabole :

- Le support (6) est en liaison pivot d'axe (O, \vec{y}_0) avec la nacelle (4) et le contre poids (5) c'est l'angle azimut noté α
- Le réflecteur (3) est en liaison pivot d'axe (C, \vec{x}_1) c'est l'angle d'élévation noté β .

Un moteur d'élévation installé entre le support (1) et l'ensemble (2) (Parabole et CP) pour piloter l'angle β

Les principaux repères adoptés sont :

Le repère $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ associé au pylône (7).

Le repère $R_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ associé à l'arbre de rotation azimut 1.

Le repère $R(C, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ associé à l'ensemble 2.

On a $CB = b$, $CG_p = a$

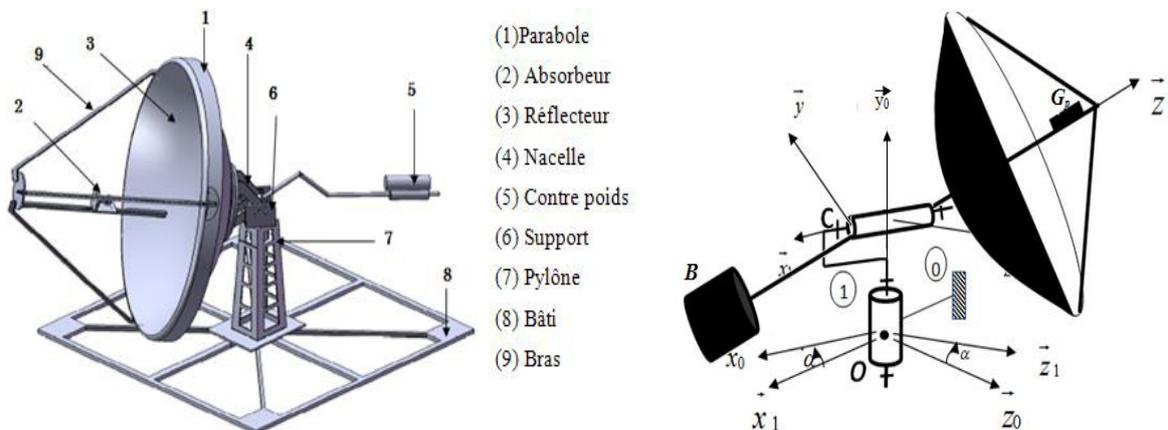


Figure 1 : Infrastructure du concentrateur solaire.

2. Simulation d'un CSP

2.1. Suivi pilotage d'élévation

L'objectif de cette partie est de déterminer les paramètres intervenants dans le pilotage de l'axe d'élévation.

3.1.1. Etude cinématique

On peut réaliser un graphe d'isolement pour déterminer le vecteur rotation $\vec{\Omega}(2/0)$ de l'ensemble 2 par rapport au pylône 0

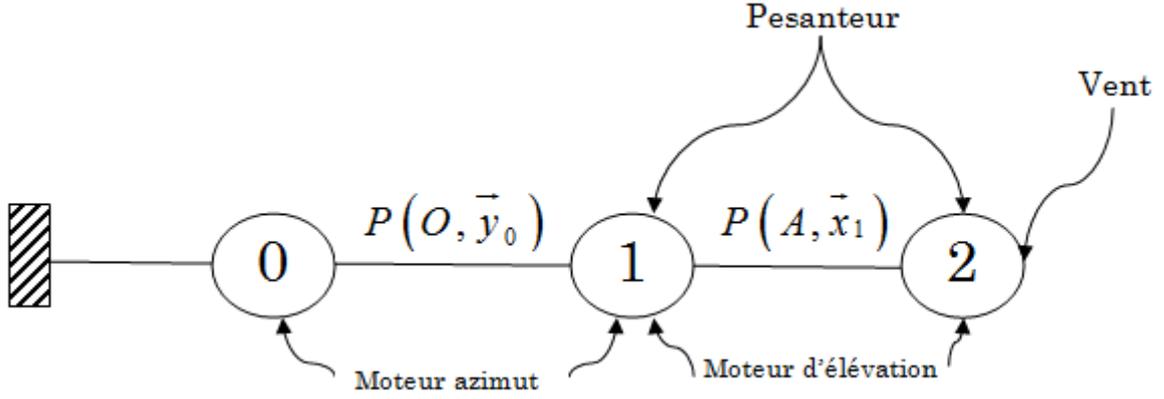


Figure. 2: Schéma cinématique pour le pilotage de l'axe d'élévation.

On voit immédiatement que : $\vec{\Omega}(2/0) = \vec{\Omega}(2/1) + \vec{\Omega}(1/0) = \dot{\alpha}\vec{y}_0 + \dot{\beta}\vec{x}_1$

3.1.2. Etude statique

Dans cette étude, l'angle azimut est nul $\alpha = 0$ et l'angle d'élévation $\beta =$ constante et seules les masses de la parabole m et la masse du contre poids m_0 sont prises en compte. Toutes les autres masses sont négligées. En appliquant le principe fondamental de la statique en A à l'ensemble 2 à fin de calculer le couple moteur d'élévation Cm_e .

Le bilan des actions mécaniques extérieures appliquées sur 2 sous forme des torseurs définies au centre d'inertie de chaque action est le suivant:

L'action de la force de pesanteur sur la parabole est définie par le torseur suivant:

$$\text{Torseur}\{Force\ de\ pesanteur \rightarrow Parabole\} = \left\{ \overline{P}_p; \overline{M}_{\overline{P}_p, G_p} \right\}_{G_p} = \left\{ -M \cdot g \cdot \vec{y}_0; \vec{0} \right\}_{G_p}$$

L'action de la force de pesanteur sur le contre poids (CP) est définie par le torseur suivant:

$$\text{Torseur}\{Force\ de\ pesanteur \rightarrow Contre\ poids\} = \left\{ \overline{P}_{cp}; \overline{M}_{\overline{P}_{cp}, B} \right\}_B = \left\{ -m_0 \cdot g \cdot \vec{y}_0; \vec{0} \right\}_B$$

L'action du vent sur l'ensemble 2 est définie par le torseur suivant:

$$\text{Torseur}\{vent \rightarrow ensemble\ 2\} = \left\{ \overline{F}_v; \overline{M}_{\overline{F}_v, B} \right\}_B = \left\{ -F_v \cdot \vec{z}_0; \vec{0} \right\}_B$$

L'action du pylône sur l'ensemble 2 est définie par le torseur suivant :

$$\text{Torseur}\{Pylone \rightarrow ensemble\ 2\} = \left\{ \overline{R}_{(pyl,2)}; \overline{M}_{\overline{R}_{(pyl,2)}, C} \right\}_C$$

Sachant que la liaison entre l'ensemble 2 et le pylône (7) noté 1 est une liaison pivot d'axe (C, \vec{x}_1) on a donc

$$\overline{M}_{\overline{R}_{(pyl,2)}, C} \cdot \vec{x}_1 = \vec{0} \text{ (voir Annexe 2).}$$

L'action du moteur d'élévation sur l'ensemble 2 est exprimée comme suit :

$$\text{Torseur}\{moteur\ élévation \rightarrow ensemble\ 2\} = \left\{ \overline{F}_{me}; \overline{M}_{\overline{F}_{me}, C} \right\}_C = \left\{ \vec{0}; Cm_e \cdot \vec{x}_1 \right\}_C$$

Le bilan des actions mécaniques extérieures appliquées sur l'ensemble 2 défini au point C est le suivant:

L'action de la force de pesanteur sur la parabole en A est définie par le torseur suivant:

$$\text{Torseur}\{Force\ de\ pesanteur \rightarrow Parabole\} = \left\{ \overline{P}_p; \overline{M}_{\overline{P}_p, C} \right\}_C = \left\{ -M \cdot g \cdot \vec{y}_0; \overline{CG}_p \wedge (-M \cdot g \cdot \vec{y}_0) \right\}_C$$

L'action de la force de pesanteur sur le contre poids (CP) en C est définie par le torseur suivant:

$$\text{Torseur}\{Force\ de\ pesanteur \rightarrow Contre\ poids\} = \left\{ \overline{P}_{cp}; \overline{M}_{\overline{P}_{cp}, C} \right\}_C = \left\{ -m_0 \cdot g \cdot \vec{y}_0; \overline{CB} \wedge (-m_0 \cdot g \cdot \vec{y}_0) \right\}_C$$

L'action du vent sur l'ensemble 2 en C est définie par le torseur suivant:

$$\text{Torseur}\{\text{vent} \rightarrow \text{ensemble } 2\} = \left\{ \overrightarrow{F_v}; \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{F_v}, C} \right\}_C = \left\{ -F_v \cdot \overrightarrow{z_0}; \overrightarrow{CG_p} \wedge (-F_v \cdot \overrightarrow{z_0}) \right\}_C$$

Action du moteur d'élévation sur l'ensemble 2 en C est exprimée comme suit :

$$\text{Torseur}\{\text{moteur élévation} \rightarrow \text{ensemble } 2\} = \left\{ \overrightarrow{F_{me}}; \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{F_{me}}, C} \right\}_C = \left\{ \vec{0}; Cm_e \cdot \overrightarrow{x_1} \right\}_C$$

Action du pylône sur l'ensemble 2 en C est définie par le torseur suivant :

$$\text{Torseur}\{\text{Pylone} \rightarrow \text{ensemble } 2\} = \left\{ \overrightarrow{R}_{(pyl,2)}; \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{R}_{(pyl,2)}, C} \right\}_C$$

3.1.3. Le principe fondamental de la statique

En appliquant le principe fondamental de la statique en C des actions mécaniques extérieures appliquer sur l'ensemble 2, l'équation du moment résultante suivant $\overrightarrow{x_1}$ nous donne :

$$\begin{aligned} \sum \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{F_{ext}}, C \rightarrow 2} \cdot \overrightarrow{x_1} &= \vec{0} \\ (\overrightarrow{M}_{\overrightarrow{F_{me}}, C} + \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{R}_{(pyl,2)}, C} + \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{P_p}, C} + \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{P_{cp}}, C} + \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{F_v}, C}) \cdot \overrightarrow{x_1} &= \vec{0} \\ \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{F_{me}}, C} \cdot \overrightarrow{x_1} + \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{R}_{(pyl,2)}, C} \cdot \overrightarrow{x_1} + \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{P_p}, C} \cdot \overrightarrow{x_1} + \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{P_{cp}}, C} \cdot \overrightarrow{x_1} + \overrightarrow{M}_{\overrightarrow{F_v}, C} \cdot \overrightarrow{x_1} &= \vec{0} \end{aligned} \quad (1)$$

Après tout calcul fait nous trouvons que le couple moteur d'élévation Cm_e égale à :

$$Cm_e = m_0 \cdot g \cdot b \cdot \cos \beta + M \cdot g \cdot a \cdot \sin \beta - F_v \cdot a \cdot \sin \beta \quad (2)$$

3.2. Suivi de pilotage en azimut

3.2.1. Etude cinétique

La parabole est une portion de sphère, de rayon R, délimitée par un cône de sommet O et de demi-angle ψ définie par : $\tan \psi = \frac{R}{h}$. la matrice d'inertie de l'ensemble 2 est la somme de la matrice de la parabole et celle du CP au point C et elle est défini par :

$$[I_C(2)] = \begin{pmatrix} A_2 + M \cdot (a^2 - z_G^2) + m_0 \cdot b^2 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 + M \cdot (a^2 - z_G^2) + m_0 \cdot b^2 \end{pmatrix}_{(\overrightarrow{x}, \overrightarrow{y}, \overrightarrow{z})} \begin{cases} A_2 = \frac{1}{6} (4 + \cos \psi_p + \cos^2 \psi_p) R^2 \cdot M \\ B_2 = \frac{1}{3} (2 - \cos \psi_p - \cos^2 \psi_p) R^2 \cdot M \\ C_2 = \frac{1}{6} (4 + \cos \psi_p + \cos^2 \psi_p) R^2 \cdot M \end{cases}$$

3.2.2. Etude dynamique

L'objectif de cette partie est de déterminer le couple moteur de pilotage de l'axe azimut Cm_a . On considère le point C comme centre d'inertie de l'ensemble 2.

Hypothèses

La vitesse de rotation de l'axe azimut est constante: $\dot{\alpha} = 0$.

L'action du vent est nulle.

La masse du contre poids est ponctuelle en B

L'arbre de rotation azimut **1** est dynamiquement équilibré.

Le centre d'inertie de l'ensemble **2** est situé au point C.

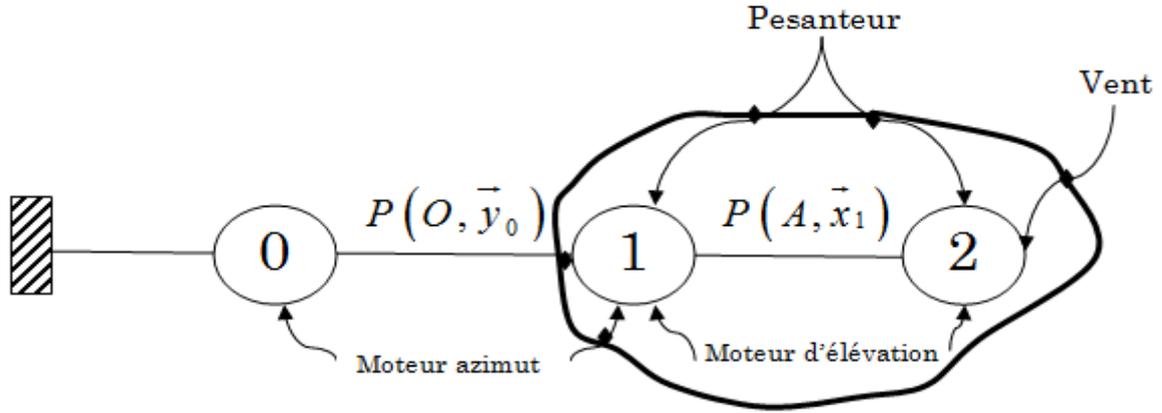


Figure. 3: Schéma cinématique pour le pilotage de l'axe azimutale.

Pour atteindre l'objectif il est nécessaire de calculer le moment dynamique de l'ensemble (1,2) au point C projeté sur l'axe (C, \vec{y}_0) .

3.2.3. Le vecteur moment cinétique

Le vecteur moment cinétique de l'ensemble 2 par rapport au centre d'inertie C est le produit du vecteur vitesse angulaire de l'ensemble 2 et la matrice d'inertie de l'ensemble 2 par rapport au centre d'inertie C.

$$\vec{\sigma}(C, 2/0) = [I_c(2)] \cdot \vec{\Omega}(2/0)$$

$$= [I_c(2)] \cdot (\dot{\alpha} \cdot \vec{y}_0 + \dot{\beta} \cdot \vec{x}_1)$$

$$\vec{\sigma}(C, 2/0) = \dot{\beta} \cdot A \cdot \vec{x} + \dot{\alpha} \cdot \cos \beta \cdot B \cdot \vec{y} + \dot{\alpha} \cdot \sin \beta \cdot C \cdot \vec{z}$$

3.2.4. Le moment dynamique

Le moment dynamique de l'ensemble 2 par rapport à 0 se déduit du moment cinétique par la relation suivante (voir Annexe 2) :

$$\vec{\delta}(C, 2/0) = \left[\frac{d}{dt} \vec{\sigma}(C, 2/0) \right]_{R_0} = \left[\frac{d}{dt} \vec{\sigma}(C, 2/0) \vec{y}_0 \right]_{R_0} - \vec{\sigma}(C, 2/0) \left[\frac{d}{dt} \vec{y}_0 \right]_{R_0} \text{ avec } \left(\left[\frac{d}{dt} \vec{y}_0 \right]_{R_0} \right) = 0$$

Après tout calcul fait et avec $\ddot{\alpha} = 0$, on obtient :

$$\vec{\delta}(C, 2/0) \cdot \vec{y}_0 = \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \cdot \sin(2\beta) \cdot [B - C]$$

3.2.5. Bilan des actions mécaniques extérieures

Le bilan des actions mécaniques extérieures appliquées sur le mécanisme est le suivant :

Action de la pesanteur P_t sur l'ensemble 2 au point C.

$$\text{Torseur} \{ \text{Pesanteur} \rightarrow \text{ensemble 2} \} = \left\{ \vec{P}_t; \vec{M}_{\vec{r}_{c,c}} \right\}_C = \left\{ \vec{P}_p + \vec{P}_{cp}; \vec{M}_{\vec{r}_{c,c}} \right\}_C = \left\{ -(M + m_0) \cdot g \cdot \vec{y}_0; \vec{0} \right\}_C$$

Action de pylône sur le support 4 au point O

$$\text{Torseur} \{ 0 \rightarrow 1 \} = \left\{ \vec{R}_{(0,1)}; \vec{M}_{\vec{r}_{(0,1),o}} \right\}_O \text{ Avec } \vec{M}_{\vec{r}_{(0,1),o}} \cdot \vec{y}_0 = \vec{0}$$

Un moteur azimut installé entre le pylône(0) et le support (1) pour piloter l'angle azimut α L'action du moteur azimut sur le support 4 au point O

$$\{ T(\text{Moteur azimut}: 0 \rightarrow 1) \} = \{ \vec{0}; C m_a \cdot \vec{y}_0 \}_O$$

Le bilan des actions mécaniques extérieures appliquées sur le mécanisme en C est le suivant :

Action de la pesanteur P_t sur l'ensemble 2 au point C

$$\text{Torseur} \{ \text{Pesanteur} \rightarrow \text{ensemble 2} \} = \left\{ \vec{P}_t; \vec{M}_{\vec{r}_{c,c}} \right\}_C = \left\{ \vec{P}_p + \vec{P}_{cp}; \vec{M}_{\vec{r}_{c,c}} \right\}_C$$

Action de pylône sur le support 4 au point C

$$\text{Torseur} \{ 0 \rightarrow 1 \} = \left\{ \vec{R}_{(0,1)}; \vec{M}_{\vec{r}_{(0,1),c}} \right\}_C$$

L'action du moteur azimut sur le support 4 au point C

$$\{ T(\text{Moteur azimut}: 0 \rightarrow 1) \} = \{ \vec{0}; C m_a \cdot \vec{y}_0 \}_C$$

3.2.6. Principe fondamentale de la dynamique

En appliquant le principe fondamental de la dynamique au système isolé en C selon \vec{y}_0 on trouve :

$$\sum \overline{M} (C, 1+2 \rightarrow 1+2) \vec{y}_0 = \overline{\delta} (C, 1+2/0) \vec{y}_0$$

$$\overline{M}_{\vec{r}_1, C} \cdot \vec{y}_0 + \overline{M}_{\vec{r}_{(0,1)}, C} \cdot \vec{y}_0 + \overline{M}_{\text{azimut}(0 \rightarrow 1), C} \cdot \vec{y}_0 = \overline{\delta} (C, 1+2/0) \vec{y}_0$$

Finalement le couple moteur de pilotage de l'axe azimut Cm_a :

$$Cm_a = [B - C] \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \cdot \sin 2\beta \quad (3)$$

3. Choix des moteurs électriques pour pivoter le mécanisme

Après cette étude mécanique et suivant les valeurs du couple moteur azimutal et celle d'élévation trouvés nous pouvons choisir les moteurs électriques convenables et les réducteurs de vitesse.

3.1. Choix des réducteurs de vitesse

La vitesse du soleil est très faible. Elle vaut une tour par 24 heures. Dans ce cas, il faut que le moteur tourne à une faible vitesse avec un couple important assurant l'entraînement du réflecteur. Mais il ne peut pas jouer ce rôle tout seul. Il faut donc coupler chaque moteur électrique à un réducteur de vitesse afin de pouvoir diminuer la vitesse de rotation de moteur et d'augmenter sa couple permettant d'assurer la rotation du réflecteur.

Pour que le réflecteur parabolique puisse supporter les forces du vent, nous avons équipé le concentrateur par deux réducteurs de vitesse à roue et vis sans fin de type WG075-40-E-F sur chaque axe de rotation.



Figure. 4.: Réducteur de vitesse type WG075-40-E-F.

Le choix d'un tel réducteur est basé sur la conception du réducteur de vitesse. En effet, le mécanisme de roue et de vis sans fin permet de changer l'axe d'une rotation: alors que la vis tourne autour de son axe, le pignon tourne autour d'un axe différent perpendiculaire au premier. L'engrenage formé est généralement irréversible c'est-à-dire quand l'angle de l'hélice est inférieur à 5 degrés la vis peut entrainer le pignon, mais pas le contraire [7].

Dans notre cas la rotation du réducteur n'est pas autorisée que lorsqu'on entraine son axe d'entrée seulement. Même si son axe de sortie est exercé par un couple, il reste bloqué et ne fonctionne pas. Ce qui présente un avantage pour la sécurité du concentrateur contre les forces du vent. En effet, sa rotation n'est pas assurée que par la rotation de l'axe d'entrée de réducteur où on doit coupler après les moteurs électriques.

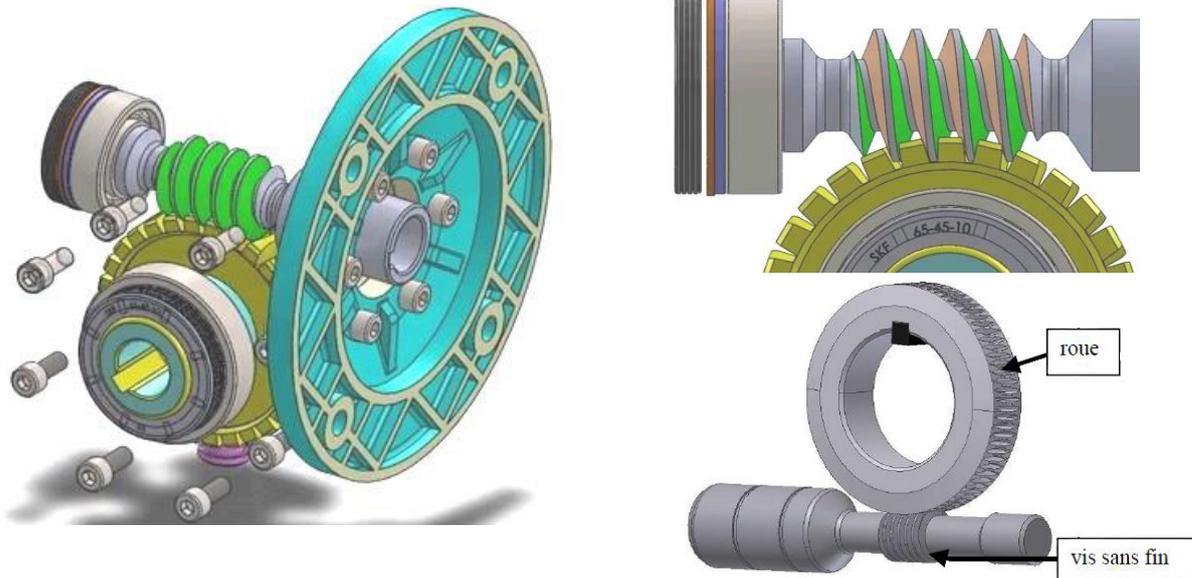


Figure 5: Réducteur de vitesse vis sans fin.

3.2. Moteur électrique choisi du CSP

Ces trois types de moteurs peuvent réaliser notre objectif de positionnement. La puissance du moteur à choisir est déjà déterminée théoriquement grâce à l'étude mécanique effectuée. Le problème est qu'aucun type de ces moteurs étudiés n'est disponible sur le marché. Dans ce cas nous avons pensé d'exploiter un moteur d'un vérin électrique d'une antenne parabolique après avoir effectué quelques modifications pour résoudre le problème d'adaptation et d'accouplement mécanique avec le réducteur de vitesse.

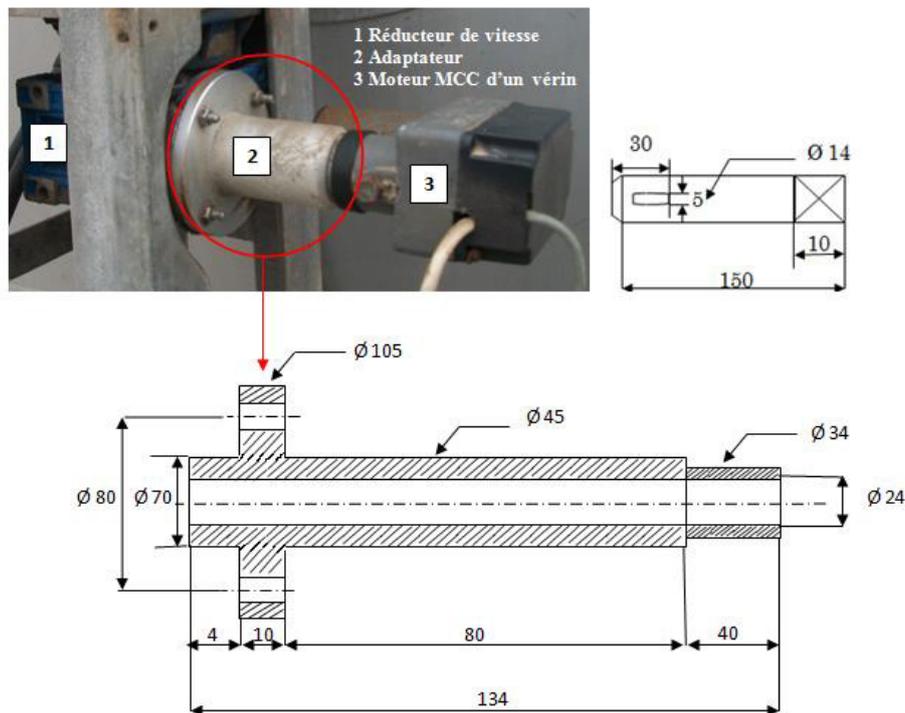


Figure 6: Adaptateur de fixation entre le réducteur de vitesse et le MCC.

Ce moteur est à courant continu, il fonctionne en mode tout ou rien ce qui entraîne une commande simple et il possède un générateur d'impulsion qu'on appelle le sensor. Ce dernier a pour rôle d'envoyer des impulsions lorsque le moteur tourne. Dans ce cas, on peut l'utiliser un capteur de position permettant de contrôler l'angle de déviation du concentrateur, si on compte le nombre des impulsions qu'il peut générer.

En deuxième temps, ce type de réducteur peut résoudre un problème d'accouplement mécanique entre son axe d'entrée et l'axe du moteur électrique. En effet, l'entrée du réducteur possède une bride où il faut assembler la bride d'un moteur électrique. Dans ce cas, on doit choisir un moteur ayant une bride de même diamètre que celui

du réducteur. Pour cela, nous avons conçu et réalisé un adaptateur de fixation entre le réducteur de vitesse du concentrateur et le moteur à courant continu (voir Figure 6).

4. Conclusion

Dans ce travail une description détaillée d'un concentrateur solaire parabolique conçu et réalisé au CRTEn est faite, nous avons fait une étude mécanique, cinématique et dynamique afin de déterminer la puissance des moteurs électrique convenables pour la poursuite solaire de ce système. En se basant sur cette étude nous avons choisi les moteurs électrique et les réducteurs de vitesse les plus adéquats pour notre système. Ceci peut nous aider à choisir le suiveur solaire le plus convenable pour notre système.

Références

1. Site internet: <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/solar-photovoltaics>.
2. Rafeeu Y, Ab Kadir M.Z.A .Thermal performance of parabolic concentrators under Malaysian environment: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16: 3826– 3835.
3. Negi B.S, Purohit I, Experimental investigation of a box type solar cooker employing a non-tracking concentrator. *Energy Conversion management* 2005; 46: 577–604.
4. Li Z, Tang D, Du J, Li T, Study on the radiation flux and temperature distributions of the concentrator receiver system in a solar dish/Stirling power facility. *Applied Thermal Engineering* 2011; 31:1780-1789.
5. Lokeswaran S, Eswaramoorthy M, Experimental studies on solar parabolic dish cooker with porous medium. *Applied solar Energy* 2012; 48:169–174.
6. M.M. Abu-Khader, O.O. Badran, S. Abdallah.Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan., *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:864–873.
7. Site internet: www.rcesrl.com/it2/images/PDF/ELVEM/riduttori%20ELVEM.pdf.