

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Gm.0545

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
Centre de THIES

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

Titre :

**Conception d'un système automatique
pour la maintenance des cellules
photovoltaïques**

Auteur : M. Saliou FAYE

Directeur interne : M. Ousmane SOW

Directeur externe : M. Atife DIOUF

Juillet 2009

DEDICACES

A mes très chers parents

Pour leurs sacrifices et leur patience,

A mes frères et sœurs pour leur soutien et leur encouragement,

*A toute ma famille qui n'a jamais manqué de m'apporter toute sorte
d'aide,*

Je dédie ce mémoire de fin d'études.

REMERCIEMENTS

Après avoir rendu louanges à DIEU, je tiens à adresser mes profonds et sincères remerciements à **Monsieur Ousmane SOW**, enseignant à l'Ecole Polytechnique de Thiès et encadrant du projet, pour nous avoir proposé ce sujet, pour sa disponibilité, ses conseils généreux et pour la qualité de son encadrement aussi bien technique que moral.

Je voudrais également exprimer toute ma gratitude à **Monsieur Atife DIOUF**, ingénieur technico-commercial au bureau d'études REESE et co-encadrant du projet, pour son assistance lors de la réalisation de ce projet et pour sa disponibilité qui m'a permis de mener à terme ce travail. Son encadrement m'a été très bénéfique.

J'exprime mes sincères remerciements à toutes les **personnes** qui, de près ou de loin, de par leurs actes ou conseils, ont contribué à la réalisation de ce projet.

Enfin, je veux remercier tous nos **enseignants**. Sans le savoir faire qu'ils n'ont cessé de nous communiquer, ce projet n'aurait pu être mené à bien.

Sommaire

La maintenance des cellules photovoltaïques est le problème majeur rencontré par les producteurs d'électricité et de chaleur à partir de l'énergie solaire cherchant à améliorer le rendement de ces cellules.

Ce projet vise à réaliser un système de maintenance capable de lutter contre les effets néfastes des intempéries sur les cellules photovoltaïques. Pour ce faire, une machine automatisée a été conçue et adaptée aux installations photovoltaïques. Elle permet de nettoyer de façon régulière la surface des panneaux solaires d'une installation donnée.

Mots clés : système de maintenance, cellules PV, automatisation.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
Sommaire.....	III
TABLE DES MATIERES	IV
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures	VIII
Liste des abréviations	IX
AVANT PROPOS.....	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Partie A : Dossier documentaire sur les champs solaires.....	3
<i>Introduction.....</i>	<i>4</i>
<i>Chapitre 1 : Généralités sur le rayonnement solaire.....</i>	<i>5</i>
1. Généralités sur le mouvement apparent du soleil	5
2. Le spectre solaire	6
3. La constante solaire	6
4. La masse atmosphérique	6
5. La diffusion moléculaire	7
6. L'absorption sélective des gaz	8
7. La diffusion par les aérosols	8
8. Les composantes au sol du rayonnement solaire	8
<i>Chapitre 2 : Généralités sur les champs solaires.....</i>	<i>9</i>
1. L'énergie solaire	9
2. L'énergie solaire photovoltaïque.....	10

2.1. Préambule.....	10
2.2. Historique	10
2.3. Situation contemporaine	11
2.4. Technologies	12
2.4.1. Silicium monocristallin	12
2.4.1.1. Avantages	12
2.4.1.2. Inconvénients	12
2.4.2. Silicium polycristallin	13
2.4.2.1. Avantages	13
2.4.2.2. Inconvénients	13
2.4.3. Silicium amorphe	13
2.4.3.1. Avantages	14
2.4.3.2. Inconvénients	14
2.5. Principe de fonctionnement.....	14
2.5.1. La cellule photovoltaïque.....	14
2.5.2. Le semi-conducteur.....	15
2.6. Systèmes photovoltaïques.....	16
2.7. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque.....	17
2.7.1. Avantages.....	17
2.7.2. Inconvénients.....	18
2.8. Domaines d'application	18
2.8.1. Domaine spatial.....	18
2.8.2. Habitation isolée.....	19
2.8.3. Industrie isolée.....	20
2.8.4. Centrale de puissance	20
2.8.5. Résidence urbaine	21
2.8.6. Biens de consommation.....	22
3. Performance des champs solaires	22
<i>Conclusion partielle.....</i>	<i>24</i>

Partie B : Conception du système de maintenance autonome25

Introduction.....26

<i>Chapitre 3 : Etude du mécanisme.....</i>	<i>27</i>
1. Analyse du système dans son environnement	27
1.1. Définitions.....	27
1.2. Identification des fonctions de service du système de maintenance.....	27
1.2.1. Identification des interacteurs.....	27
1.2.2. Identification des fonctions de service.....	28
2. Analyse fonctionnelle du système.....	30
3. Présentation globale du système de maintenance.....	33
4. Présentation schématique du système de maintenance retenu	33
4.1. Schéma cinématique	33
4.2. Nomenclature	34

4.3. Description du fonctionnement	35
4.4. Paramètres cinématiques.....	35
5. Etudes technologiques.....	35
5.1. Présentation des solutions technologiques retenues	35
5.2. Dessin d'ensemble	36
5.3. Nomenclature	36
5.4. Description.....	37
5.5. Caractéristiques techniques	38
5.5.1. Aspect géométrique.....	38
5.5.2. Aspect cinématique	39
6. Visualisation en 3D des sous-ensembles.....	39
<i>Chapitre 4 : Commande – Automatisation du système</i>	<i>41</i>
1. Un système automatisé : trois points de vue	41
1.1. Définition d'un système automatisé.....	41
1.2. Modèles de représentation d'un système automatisé.....	41
2. Présentation du process	43
2.1. Description fonctionnement	43
2.2. Le grafcet du cycle	44
2.2.1. Définition d'un grafcet.....	44
2.2.2. Grafcet fonctionnel du système.....	44
2.2.3. Grafcet technologique du système	45
2.2.4. Réalisation par câblage.....	47
2.2.4.1. Câblage des étapes du grafcet	47
2.2.4.2. Câblage du grafcet.....	48
2.2.5. Réalisation de mémoires par automaintien.....	50
2.2.5.1. Réalisation électrique câblée des étapes.....	50
2.2.5.2. Réalisation électrique câblée du système.....	52
<i>Chapitre 5 : Dimensionnement de l'installation.....</i>	<i>54</i>
1. Choix des composants mécaniques	54
1.1. Détermination du couple moteur.....	54
1.2. Choix des roulements	60
1.3. Choix des matériaux	61
2. Choix des composants électriques.....	62
3. Calcul des coûts disponibles	64
<i>Conclusion partielle.....</i>	<i>66</i>
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	67
Bibliographie et webliographie	68
ANNEXES	69

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Nomenclature du schéma cinématique du système.....	34
Tableau 3.2 : Paramètres cinématiques du système.....	35
Tableau 3.3 : Nomenclature du dessin d'ensemble.....	36
Tableau 3.4 : Caractéristiques géométriques du système.....	38
Tableau 4.1 : Conditions d'activation et de désactivation des étapes.....	48
Tableau 4.2 : Nomenclature du schéma électrique du système.....	52
Tableau 5.1 : Calcul des moments d'inertie.....	57
Tableau 5.2 : Références et prix des composants électriques.....	63
Tableau 5.3 : Coûts des composants électriques.....	64

Liste des figures

Figure 1.1 : Masse atmosphérique traversée par le rayonnement lumineux.....	7
Figure 2.1 : Silicium monocristallin.....	12
Figure 2.2 : Silicium polycristallin.....	13
Figure 2.3 : Silicium amorphe.....	14
Figure 2.4 : Principe d'une cellule photovoltaïque.....	16
Figure 3.1 : Interacteurs du système.....	28
Figure 3.2 : Fonctions de service du système.....	29
Figure 3.3 : Représentation FAST du système.....	32
Figure 3.4 : Déplacement du système sur des panneaux solaires.....	33
Figure 3.5 : Schéma cinématique du système.....	34
Figure 3.6 : Dessin d'ensemble.....	36
Figure 3.7 : Sous-ensembles du système.....	40
Figure 4.1 : Modèles de représentation.....	42
Figure 4.2 : Grafcet fonctionnel du système.....	45
Figure 4.3 : Grafcet technologique du système.....	46
Figure 4.4 : Schéma de câblage des étapes du grafcet.....	47
Figure 4.5 : Schéma de câblage du grafcet.....	49
Figure 4.6 : Câblage électrique des étapes du grafcet.....	51
Figure 4.7 : Câblage électrique du grafcet.....	53
Figure 5.1 : Schéma cinématique du sous système S1.....	54
Figure 5.2 : Schéma cinématique du sous système S2.....	56
Figure 5.3 : Schéma cinématique réduit du système.....	56
Figure 5.4 : Roulement du tambour sur la plaque.....	58

Liste des abréviations

D.I.C. : Diplôme d'Ingénieur de Conception

D.U.T. : Diplôme Universitaire de Technologie

E.N.S.E.P.T. : Ecole Nationale Supérieure Enseignement Professionnel et Technologique

E.N.S.U.T. : Ecole Nationale Supérieure Universitaire et Technologique

E.P.T. : Ecole Polytechnique de Thiès

F.C.F.A. : Franc de la Communauté Financière d'Afrique

U.C.A.D. : Université Cheikh Anta DIOP

AM : air-masse

CESI : Chauffe Eau Solaire Individuel

SSC : Système Solaire Combiné

KWh : kilowatts-heure

WC : watt-crête

Si : Silicium

eV : électronvolt

c-Si : silicium cristallin

a-Si : silicium amorphe

P: phosphore

B: bore

W: watt

V: Volt

BOS: Balance of System

UV : ultra-violets

AsGa : arséniure de gallium

InP : phosphure d'indium

CdTe : tellure de cadmium

TV : télévision

PV : photovoltaïque

FP : fonction principale

FC : fonction contrainte

FAST: Function Analysis System Technic

SADT: Structured Analysis for Design and Technic

NO : Normalement ouvert

NF : Normalement fermé

Dcy : départ de cycle

ToR : Tout ou Rien

EV : électrovanne

V : vérin

CC : courant continu

AVANT PROPOS

L'Ecole Supérieure Polytechnique (E.S.P.) est un établissement qui regroupe, depuis la réforme de 1994, l'EX - E.N.S.U.T., l'EX - E.N.S.E.P.T.

Elle est rattachée à l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar et comporte deux centres : le centre de Dakar et le centre de Thiès.

L'E.S.P. comporte cinq départements repartis dans les deux centres comme suit :

❖ Centre de Dakar :

- Département du Génie Chimie
- Département du Génie Civil (formation continue)
- Département du Génie Electrique
- Département du Génie Informatique
- Département du Génie Mécanique (D.U.T.)

❖ Centre de Thiès :

- Département du Génie Civil
- Département du Génie Mécanique - option Electromécanique (D.I.C)

Avec la réforme de 2007, l'ESP centre de Thiès est redevenue l'EPT tout en gardant le même statut et en intégrant la formation de D.U.T. en Génie Mécanique.

A la fin du cycle d'ingénieurs de conception, l'élève ingénieur est appelé à mener un projet de fin d'études, comme celui-ci, sous la direction de ses professeurs et éventuellement de personnes externes. Ce projet lui permet de mettre en application les différentes connaissances théoriques et pratiques acquises au cours de sa formation.

INTRODUCTION GENERALE

Les sources d'énergie conventionnelles telles que le nucléaire ou les combustions fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont issues de stocks limités de matières extraites du sous-sol de la terre. Chacune d'elles provoque des dégâts à long terme plus ou moins importants sur l'environnement : pollution atmosphérique, changement climatique, contamination radioactive etc. A l'opposé, les sources d'énergie renouvelable ont recours à des flux naturels qui traversent de façon plus ou moins permanente la Biosphère. Comme elles n'utilisent qu'une infime partie de ces flux, elles sont inoffensives pour l'environnement naturel aussi bien localement que globalement, et elles le seront éternellement. Toutes les énergies renouvelables sont issues directement ou indirectement du soleil.

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire PV, etc.... Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m^2 . La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de carbone, de gaz et d'uranium. Mais dans la plupart des cas, une conversion de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire.

Les cellules photovoltaïques sont les constituants des panneaux solaires. L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transmission directe de la lumière du soleil. Par ce biais, la production a connu une croissance importante depuis les années 1990-95, allant jusqu'à dépasser les 700 MWc en 2003.

Les projections les plus courantes prévoient un marché annuel est de l'ordre de 3 GWc pour l'année 2010, et entre 9 et 21 GWc pour 2020. Pour faire face à cette croissance, nous jugeons nécessaire de rendre optimal le rendement des cellules photovoltaïques en concevant un système qui permet de lutter contre les effets néfastes des intempéries. En effet, ces derniers contribuent à une atténuation conséquente de l'échange thermique, donc une réduction d'efficacité en termes de rendement.

Ce rapport comprend cinq chapitres. Les deux premiers chapitres constituent la première partie qui est un dossier documentaire sur les champs solaires. La deuxième partie, constituée de trois chapitres, consiste en une conception du système autonome de

maintenance des cellules photovoltaïques. Dans le premier volet, expose des notions préliminaires sur le rayonnement solaire.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons d'une manière générale l'énergie solaire, ensuite l'énergie des cellules photovoltaïques tout en tenant compte des dernières innovations et enfin les performances des champs solaires.

Le chapitre trois est réservé à la conception du système. Il permet par modélisation de comprendre la problématique et de développer une solution adéquate. Par la suite nous présenterons les solutions retenues ainsi que les performances du système.

Dans le quatrième chapitre, nous aborderons la partie automatique du système. Dans cette partie, nous allons présenter les différentes démarches adoptées pour automatiser le système.

Dans le dernier chapitre (cinq), nous allons aborder le dimensionnement de certains composants de l'installation, et ensuite terminer ce rapport par un devis estimatif du système.

Partie A : Dossier documentaire sur les champs solaires

Introduction

Les systèmes photovoltaïques utilisent l'énergie la mieux répartie dans le monde : la lumière du soleil. Actuellement, des milliers de systèmes photovoltaïques produisent de l'électricité pour des applications telles que l'électrification rurale, l'électrification en zone urbaine, le traitement de l'eau, les télétransmissions ou les équipements publics.

Ces réalisations ont mis en valeur les qualités de l'électricité solaire photovoltaïque. Sa fiabilité, son autonomie, son influence faible sur l'environnement, son coût souvent compétitif ont rendu son utilisation particulièrement fréquente sur des sites éloignés du réseau électrique, appelés aussi sites isolés.

Cette première partie traite de la performance des champs solaires en termes de puissance absorbée, de rendement ou de l'énergie solaire photovoltaïque obtenue. Cette partie s'appuie sur des nouveautés, c'est-à-dire les dernières innovations et des articles récents.

Aussi nous paraît-il nécessaire dans un premier temps de présenter la source originelle de production d'électricité, « le Soleil ».

Chapitre 1 : Généralités sur le rayonnement solaire

1. Généralités sur le mouvement apparent du soleil [1]

Le soleil est une sphère gigantesque dont la masse est $2 \cdot 10^{30}$ Kg et le rayon 698 000 Km (masse de la terre : $6 \cdot 10^{24}$ Kg et le rayon de la terre : 6400 Km). Il est le siège de processus thermonucléaires se ramenant toujours à la transformation d'hydrogène en hélium avec libération d'énergie. Le soleil existe depuis environ quatre milliards d'années et continuera de nous éclairer durant cinq milliards d'années.

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse, dont le soleil occupe un des foyers (première loi de Kepler). Le plan de cette ellipse s'appelle l'écliptique. La distance de la Terre au Soleil varie de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149,675 \cdot 10^6$ Km.

La vitesse de déplacement de la Terre sur sa trajectoire est variable et ceci à une incidence sur la définition du temps.

Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre s'appelle l'équateur.

L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique. L'équateur et l'écliptique font entre eux un angle que l'on appelle inclinaison i qui vaut $23^{\circ}27'$ (ou $23,45^{\circ}$).

L'angle que fait la direction du soleil (vu du centre de la Terre) avec l'équateur est appelé déclinaison δ .

2. Le spectre solaire [1]

On appelle spectre solaire, la répartition en longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique du soleil.

Cette répartition spectrale du rayonnement solaire est très proche de celle d'un corps noir à 5762K.

3. La constante solaire [2]

Le rayonnement solaire est émis de manière isotrope. Une infime partie de cette énergie atteint la Terre qui intercepte pourtant au niveau de son atmosphère $1,78.10^{14}$ KW.

La puissance qu'on recevrait sur une surface plane de $1m^2$ normale à la direction du Soleil et placée hors atmosphère est appelée constante solaire. Elle vaut approximativement $1360 W/m^2$. La mesure la plus récente effectuée à bord des satellites donne pour la constante solaire : $1367 \pm 7 W/m^2$.

4. La masse atmosphérique [1]

Un rayon lumineux qui traverse l'atmosphère est atténué par chaque molécule ou particule rencontrée. Son intensité au sol dépend donc de la longueur du trajet dans l'atmosphère.

On définit la masse atmosphérique m , en prenant pour unité l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne au dessus du niveau de la mer, par la formule :

$$m = \frac{1}{\sin h}$$

L'angle h (figure 1.1) est appelé hauteur du soleil. C'est l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan horizontal du lieu.

- $m=1$ ou air-masse1 (AM1) : le Soleil est au zénith, $h=90^\circ$
- $m=2$ ou air-masse2 (AM2), $h = 30^\circ$
- $m=3$ ou air-masse3 (AM3), $h = \arcsin \frac{1}{3}$

- etc....
- $m=0$ ou air-masse zéro (AM0), hors atmosphère

La moitié de la masse des gaz atmosphères est comprise entre le sol et l'altitude 5 km, où règne une pression deux fois moindre qu'au niveau de la mer. 90% de l'atmosphère se trouve en dessous de 15 km d'altitude où la pression n'est plus que de 100 millibars.

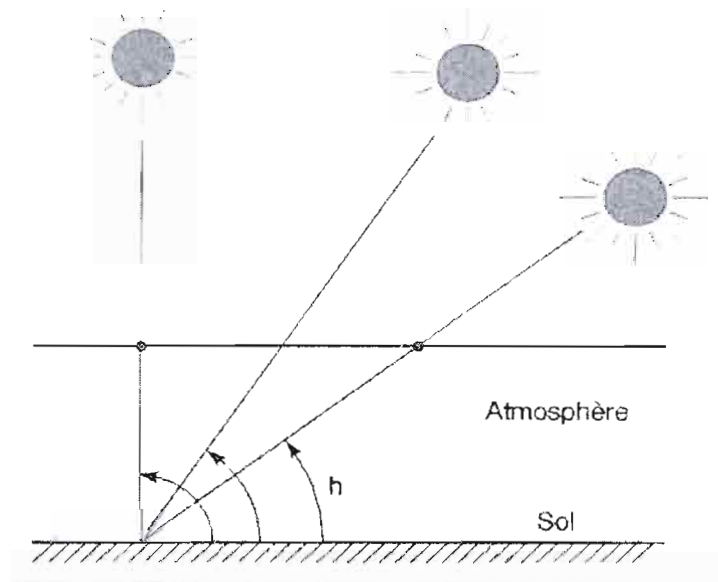


Figure 1.1 : Masse atmosphérique traversée par le rayonnement lumineux [9]

5. La diffusion moléculaire [2]

Elle est due à la présence des molécules gazeuses. Elle varie avec la longueur d'onde, elle est d'autant plus forte que la longueur d'onde est faible.

6. L'absorption sélective des gaz [1]

Pratiquement jusqu'à 80 km, la composition gazeuse reste inchangée : 78% d'azote ; 21% d'oxygène ; 0,9% d'argon ; 0,03% de gaz carbonique ; de la vapeur d'eau entre le sol et l'altitude 5 km et l'ozone entre 10 et 30 km d'altitude.

7. La diffusion par les aérosols [1]

Les particules en suspension dans l'atmosphère sont appelées aérosols : grains de sable, poussière, microgouttelettes, pollens, cristaux etc., renvoient par réflexion, réfraction ou diffusion dans toutes les directions, les rayons interceptés.

Ces aérosols ont donc tendance à atténuer le rayonnement solaire atteignant le sol et ils constituent le trouble atmosphérique β : $0,05 < \beta < 0,60$

8. Les composantes au sol du rayonnement solaire [1]

Hors atmosphère, le rayonnement reçu par la terre varie selon la période de l'année entre 1 350 et 450 W/m². Il est ensuite partiellement réfléchi et absorbé par l'atmosphère, de telle sorte que le rayonnement reçu au sol comporte une part directe I et une part diffuse D , le total variant entre 200 W/m² (ciel couvert), et environ 1 000 W/m² (au zénith par ciel clair). L'énergie reçue par une surface donnée dépend donc des conditions climatiques du lieu ainsi que de son inclinaison et de son orientation.

L'ensoleillement total G reçu par un capteur solaire peut ainsi être décomposé entre une composante directe $I \sin h$, et une composante diffuse D , que l'on considère souvent comme indépendante de l'inclinaison, alors qu'en toute rigueur elle ne l'est pas. Dans certains cas, il est souhaitable de tenir compte d'une composante de rayonnement direct réfléchi par les surfaces entourant le capteur.

Chapitre 2 : Généralités sur les champs solaires

1. L'énergie solaire [4]

Sous le nom énergie solaire, il y a en fait deux énergies différentes :

- ↓ Le solaire photovoltaïque
- ↓ Le solaire thermique

Le solaire photovoltaïque est la transformation directe du rayonnement solaire en électricité. L'effet de l'irradiation sur le silicium (couramment utilisé pour le photovoltaïque) provoque une excitation de la molécule et engendre un courant. Ce procédé est aussi utilisé pour les semi-conducteurs.

Le solaire thermique se décline en trois utilisations possibles :

- ✓ Le solaire passif consiste en l'utilisation du rayonnement pour transmettre de la chaleur dans un bâtiment par l'intermédiaire de surface vitrée et par l'orientation de la construction.
- ✓ Le solaire CESI (Chauffe Eau Solaire Individuel) est la production partielle d'eau chaude sanitaire en utilisant la chaleur du soleil.
- ✓ Le solaire SSC (Système Solaire Combiné) permet par une production plus importante, le chauffage d'eau chaude sanitaire et l'apport d'eau chaude pour le chauffage individuel.

L'utilisation de l'une ou de l'autre de ces deux conversions dépend en grande partie de l'installation hôte.

C'est dans la filière photovoltaïque que s'inscrit notre projet.

2. L'énergie solaire photovoltaïque

2.1. Préambule

L'énergie solaire est disponible partout sur terre. Notre planète reçoit 15 000 fois l'énergie consommée par l'humanité. Chaque mètre carré reçoit en moyenne 2 à 3 KWh par jour en Europe, 5 à 7 KWh par jour en Afrique. L'exploitation de l'énergie solaire peut se faire grâce à la technologie photovoltaïque. [4]

Un module photovoltaïque dit "panneau solaire" convertit entre 3 % et 30 % de l'énergie solaire qu'il reçoit en courant électrique continu. Les surfaces nécessaires à l'exploitation de l'énergie solaire sont abondantes puisque 5 % des déserts suffiraient pour alimenter la planète en énergie, mais la source (le soleil) n'est pas toujours disponible (nuit, nuages). Cette contrainte implique la possibilité de pouvoir stocker l'énergie ainsi transformée pour subvenir aux ruptures naturelles d'alimentation, maillon faible du système d'énergie solaire photovoltaïque, les systèmes actuels de stockage ne répondant pas à ce besoin. [5]

Pour contrecarrer les problèmes de stockage, il est possible de raccorder toute installation solaire photovoltaïque au réseau électrique général. La maison, immeuble ou toute construction diverse est alimentée par son toit équipé en panneaux solaires photovoltaïques, utilise l'énergie ainsi produite et vend son surplus de production d'énergie au réseau.

2.2. Historique [5]

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique des années septante pour que les

gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

2.3. Situation contemporaine [4]

La technologie photovoltaïque est en plein essor. Aux quatre coins du monde, de nombreuses possibilités d'exploitation sont étudiées puis expérimentées dans l'espoir d'une commercialisation future.

Toutefois, les prévisions de baisse des prix des modules photovoltaïques ont été trop optimistes et l'industrie photovoltaïque se trouve dans une situation difficile. En effet, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïque et les rendements de production trop faibles entraînent des coûts élevés qui freinent le volume des ventes.

On peut espérer que, dans les années à venir, la technologie photovoltaïque arrive à « maturité » (procédés simplifiés, meilleurs rendements de production) et qu'alors l'augmentation du volume de production réduise le coût des modules.

En dépit de ces difficultés, l'évolution de la technologie et du marché photovoltaïques est globalement positive. Les méthodes de fabrication se sont améliorées réduisant les coûts de production et les volumes de production ont été augmentés dans l'espoir de réduire les coûts. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 Mégawatts-crête (MWC) en 1982 à 60 MWC en 1992. La croissance du marché photovoltaïque pour 1992 a été de +10% en moyenne.

Actuellement, 90% de la production totale de modules se fait au Japon, au États-Unis et en Europe. Le solde de 10% de la production est fourni par le Brésil, l'Inde et la Chine qui sont les principaux producteurs de modules dans les pays en voie de développement. L'Afrique ne possède que 1.3% des capacités de production photovoltaïques mondiales.

Les applications photovoltaïques se répartissent de manière égale entre les pays industrialisés du nord et les pays dits en voie de développement. Il est toutefois difficile

d'établir les prévisions pour cette fin de siècle : suivant les sources, l'estimation de la capacité de production va 100 à 1 000 MWC par an.

2.4. Technologies [3]

Ce sont les cellules à base de silicium qui sont actuellement les plus utilisées, les autres types étant encore soit en phase de recherche et développement, soit trop chères et réservées à des usages ou leur prix n'est pas un obstacle. On distingue en outre, en fonction des technologies utilisées :

2.4.1. Silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme (figure 2.1).



Figure 2.1 : Silicium monocristallin

2.4.1.1. Avantages

Il possède un très bon rendement, de 150 WC/m² ou plus (en 2007).

2.4.1.2. Inconvénients

Son coût est élevé et il a un rendement faible sous un faible éclaircissement.

2.4.2. Silicium polycristallin

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux (figure 2.2).



Figure 2.2 : Silicium polycristallin

2.4.2.1. Avantages

La cellule de forme carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permet un meilleur foisonnement dans un module. On note aussi son bon rendement de conversion, environ 100 WC/m², mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin, le lingot est moins cher à produire que le monocristallin.

2.4.2.2. Inconvénients

Sous un faible éclairément son rendement est faible. Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix).

2.4.3. Silicium amorphe

Le silicium amorphe (figure 2.3) lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

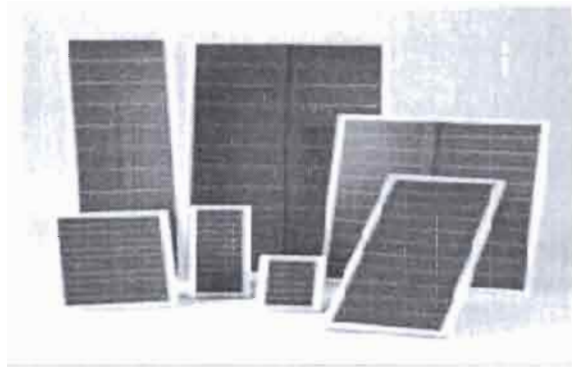


Figure 2.3 : Silicium amorphe

2.4.3.1. Avantages

Il fonctionne avec un faible éclairement (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment), il est aussi moins chère que les autres technologies et moins sensible aux températures élevées que les cellules mono ou polycristallines.

2.4.3.2. Inconvénients

Son rendement est faible en plein soleil, de $60\text{WC}/\text{m}^2$ et ses performances diminuent sensiblement avec le temps.

2.5. Principe de fonctionnement [2]

2.5.1. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

2.5.2. Le semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "band gap", Eg, en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si).

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons (particules de lumière) en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule.

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie du band gap vont libérer un électron négatif, laissant un "trou" positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique, E, de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du "dopage" par des impuretés. Deux types de dopage sont possibles :

- Le dopage de type n (négatif) consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres.
- Le dopage de type p (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type p le plus couramment utilisé pour le silicium.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Lorsque l'énergie du band gap augmente, le courant diminue mais la tension est plus élevée.

La figure 2.4 ci-dessous illustre le principe d'une cellule photovoltaïque.

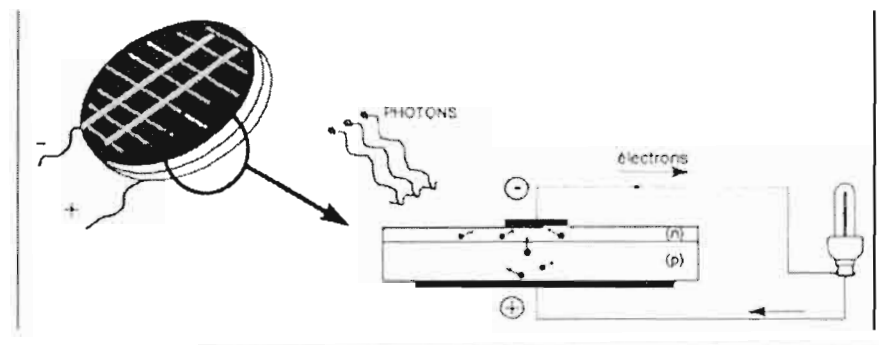


Figure 2.4 : Principe d'une cellule photovoltaïque [6]

2.6. Systèmes photovoltaïques [5]

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

L'interconnexion de modules entre eux (en série ou en parallèle) pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur

photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation (charge).

2.7. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque [2]

2.7.1. Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles) qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.

Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

2.7.2. Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

2.8. Domaines d'application

Parmi les domaines d'application des cellules solaires, nous pouvons citer :

2.8.1. Domaine spatial [2]

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante. Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans plusieurs domaines (militaire, public, etc.) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

Le spectre du rayonnement solaire étant différent en dehors de l'atmosphère, on utilise pour les cellules et les modules spatiaux d'autres matériaux plus sensibles dans les

ultra-violet et plus résistants aux rayonnements et aux bombardements divers (UV, électrons, ions, oxygène atomique, micrométéorites,...). L'arséniure de gallium (AsGa), le phosphure d'indium (InP) et le tellure de cadmium (CdTe) sont les semi-conducteurs les plus prometteurs pour réaliser ces objectifs.

2.8.2. Habitation isolée [2]

L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable pour les sociétés d'électricité. Bien que la solution des groupes électrogènes (Diesel) présente beaucoup d'inconvénients (peu fiables, peu autonomes, coûts cachés pour le combustible, les réparations et l'entretien), ils ont souvent été choisis pour leur coût d'investissement modéré. En effet, le coût initial élevé d'un générateur photovoltaïque est l'obstacle majeur à son expansion sur ce type de marché, en particulier dans les pays en voie de développement où les taux d'intérêt sont souvent très élevés.

Les dizaines de milliers d'unités photovoltaïques autonomes (au silicium cristallin ou amorphe) installées de par le monde ont pourtant démontré leur compétitivité en ce qui concerne de multiples applications de petite et moyenne puissance (inférieure à 100 kW).

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que :

- le pompage de l'eau pour la consommation du village ou pour l'irrigation,
- la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles, ...,
- l'éclairage (lampe portative, éclairage public, électrification villageoise, ...).

2.8.3. Industrie isolée

La technologie photovoltaïque est de plus en plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification rurale (habitations domestiques, écoles, centres de santé, télécommunication, ...). Le débat reste ouvert quant au choix d'un système photovoltaïque centralisé (avec un générateur photovoltaïque unique pour un ensemble d'utilisateurs dispersés) ou décentralisé (petits générateurs photovoltaïques pour chaque consommateur). Le choix dépendra d'abord de la densité de l'habitat et ensuite du mode de financement possible (pouvoir d'achat du consommateur, aide de banques locales, aide internationale,...). [6]

Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus séduisante ; on utilise avec succès dans les télécommunications (stations-relais pour TV radio, téléphonie, émetteur-récepteur,...), mais aussi pour d'autres applications telles que :

- protection cathodique,
- systèmes silencieux ou sans vibration,
- éclairage, balises et signaux pour la navigation, etc....

2.8.4. Centrale de puissance

Avec les applications PV connectés au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage ; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. Notons pour mémoire : les centrales de production photovoltaïque expérimentées depuis quelques années en Europe (44 kW en Allemagne, 300 kW en Grèce, 340 kW en Corse), aux Etats-Unis (1 MW à Lugo, 8 MW à Carissa Plain) et au Japon (1 MW à Saijo), mais elles n'ont pas encore dépassé le stade pilote. [5]

La plupart des projets utilisent des champs de capteurs plans, mais on expérimente aussi les systèmes à concentration dans les régions riches en rayonnement

direct.

Seules les centrales photovoltaïques de moyenne et faible puissances (0,1 à 0,5 MW) semblent avoir une rentabilité économique. Elles seront vraisemblablement destinées à compléter le réseau en différents points critiques. [3]

Par exemple, aux extrémités d'un réseau, la qualité de la puissance se détériore lorsque la demande en électricité augmente. Une centrale photovoltaïque placée en bout de ligne permet de redresser la tension et d'améliorer la puissance.

Lorsque la pointe de la demande est en phase avec l'ensoleillement, la centrale photovoltaïque connectée au réseau permet de fournir les pointes. [3]

Une autre application intéressante dans ce secteur est la combinaison hydro-photovoltaïque pour des centrales au fil de l'eau (0,1 à 10 MW). L'apport énergétique du système photovoltaïque, complète idéalement le creux saisonnier de certains cours d'eau, et la variation de la production sur l'année est atténuée. Cette application pourrait être développée dans nos pays dans un futur proche. [5]

2.8.5. Résidence urbaine [5]

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments

Les premières réalisations datent de la fin des années 70. L'intérêt de telles réalisations est de produire de la puissance à l'endroit même de la demande, en s'affranchissant des problèmes du stockage. L'excès de production est injecté dans le réseau, et en période de non production (la nuit), l'électricité est prélevée sur le réseau. Le compteur tourne alors dans les deux sens. L'enjeu est important mais la rentabilité est très faible, même si le WC coûte moins cher qu'en région isolée.

2.8.6. Biens de consommation [4]

L'électronique moderne requiert de très petites puissances (du Milliwatt à la dizaine de Watt) de sorte que beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les calculatrices et les montres sont de loin les applications les plus connues. Les chargeurs de batteries radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines, tondeuses à gazon, etc., sont d'autres exemples et cette liste n'est pas limitative.

La plupart de ces mini-générateurs photovoltaïques utilisent des cellules au silicium amorphe, bon marché et mieux appropriées aux faibles illuminations et petites puissances. Ils constituent une alternative très intéressante aux piles qui comportent des risques divers de contamination de l'environnement par les métaux lourds principalement.

3. Performance des champs solaires [3]

Les panneaux sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont la longueur et la largeur sont de l'ordre du mètre, pour une surface de l'ordre du m², et une masse de l'ordre de la dizaine de kg. Divers éléments (branchements électrique, fixations, éventuellement cadre pour assurer une étanchéité) sont inclus.

Il existe également des modules sous forme de membranes souples et résistantes, ainsi que des panneaux à concentration, plus complexes mais exploitant mieux l'élément le plus cher du panneau (la cellule photovoltaïque).

Leur rendement est un peu moindre que celui des cellules qui les constituent, du fait des pertes électrique internes et des surfaces non couvertes, mais reste d'environ 10 à 15%. La puissance "crête" d'un panneau photovoltaïque est de l'ordre de 100 à 200 watts par mètre carré, ce qui donne une puissance crête de 130 à 250 W par panneau, selon sa taille et ses autres caractéristiques. Cette puissance est livrée sous forme de courant continu, ce qui est parfait pour un branchement sur une batterie et pour de nombreuses

applications, mais implique une transformation en courant alternatif par un onduleur s'il s'agit de l'injecter dans un réseau de distribution. La tension dépend du type des panneaux et du branchement des cellules, elle est de l'ordre de 10 à 100 volts.

Outre sa puissance et sa surface, un panneau a quatre caractéristiques importantes :

- l'écart à la puissance nominale, de l'ordre de +/- 5% ;
- la variation de puissance avec la température (le rendement baisse quand les cellules chauffent) ;
- la stabilité dans le temps des performances (les fabricants garantissent généralement au moins 80% de la puissance de départ au bout de 20 à 25 ans) ;
- Enfin le prix : comptez environ 5 €/WC (3250 FCFA/WC).

L'énergie réellement captée par un module dépend, de la surface et de la puissance nominale du panneau mais aussi de l'ensoleillement, variable selon la latitude, la saison, l'heure de la journée, la météo, le masquage subi, etc. Chaque W permet la production en moyenne d'environ 1 kWh d'énergie sur l'année.

Un module photovoltaïque ne génère aucun déchet en fonctionnement, son coût de démantèlement est très faible et ses coûts d'exploitation sont quasi nuls. Étanche, il peut servir de couverture à un toit, sous réserve de bien maîtriser l'écoulement d'eau aux bords avec un montage adapté. La durée de vie d'un tel module est supérieure à 20 ans.

Conclusion partielle

Le marché photovoltaïque est en expansion. Le contexte énergétique, politique et environnemental est très favorable, les applications et les innovations se multiplient, la ressource est quasi illimitée.

Le photovoltaïque a quatre handicaps surmontables à moyen terme :

- le stockage en application autonome avec la durée de vie des batteries ;
- le coût élevé de l'installation ainsi que le coût de production à optimiser ;
- l'aspect juridique à régler vis-à-vis des sociétés nationales de production d'électricité.

Il devrait être d'ici 20 ans une filière énergétique importante et pourrait à long terme dominer dans les pays en développement. Il est en effet relativement rentable :

En effet,

- en terrain vierge, non électrifié, pour de puissances inférieures à 2 kW ;
- pour tout consommateur de moins 10 kWh/mois, même sur un réseau ;
- en Europe, les cellules photovoltaïques seront un jour le toit standard ;
- en termes de soudage, pour 7 humains sur 10, le photovoltaïque sera un jour l'énergie standard.

Ainsi, les installations photovoltaïques dans des zones isolées, nous incite à vouloir concevoir un système de maintenance autonome pour les cellules photovoltaïques, d'où l'objectif de la partie suivante.

Partie B : Conception du système de maintenance autonome

Introduction

La maintenance des cellules photovoltaïques consiste à nettoyer de façon régulière la surface d'un ensemble de panneaux solaires. Le principe de ce mode de maintenance repose dans un premier temps sur le dépoussiérage des panneaux solaires et dans un deuxième temps sur l'arrosage et le raclage de la surface de ces panneaux.

Dans cette partie, nous nous proposons dans une première approche de concevoir la partie mécanique du système, en partant de l'analyse fonctionnelle du système dans son environnement.

Chapitre 3 : Etude du mécanisme

1. Analyse du système dans son environnement

1.1. Définitions [7]

Fonctions : actions d'un produit ou de ses constituants exprimées exclusivement en termes de finalité.

Fonction de service : action attendue d'un produit (ou réalisé par lui) pour répondre à un besoin d'un utilisateur donné.

Fonction technique : action entre les constituants du produit défini dans le cadre d'une solution pour assurer les fonctions de service.

1.2. Identification des fonctions de service du système de maintenance

1.2.1. Identification des interacteurs

Les fonctions de service du système automatisé sont les relations de l'équipement automatisé avec les éléments de son environnement humain, physique et informationnel. Parmi ces éléments, appelés « interacteurs », nous distinguons (figure 3.1) :

- un milieu isolé,
- un environnement ensoleillé et poussiéreux,
- des réseaux d'énergie (alimentation électrique monophasée et eau),
- des capteurs solaires nettoyés,
- un support,
- une main d'œuvre peu qualifiée,
- et des capteurs solaires poussiéreux.

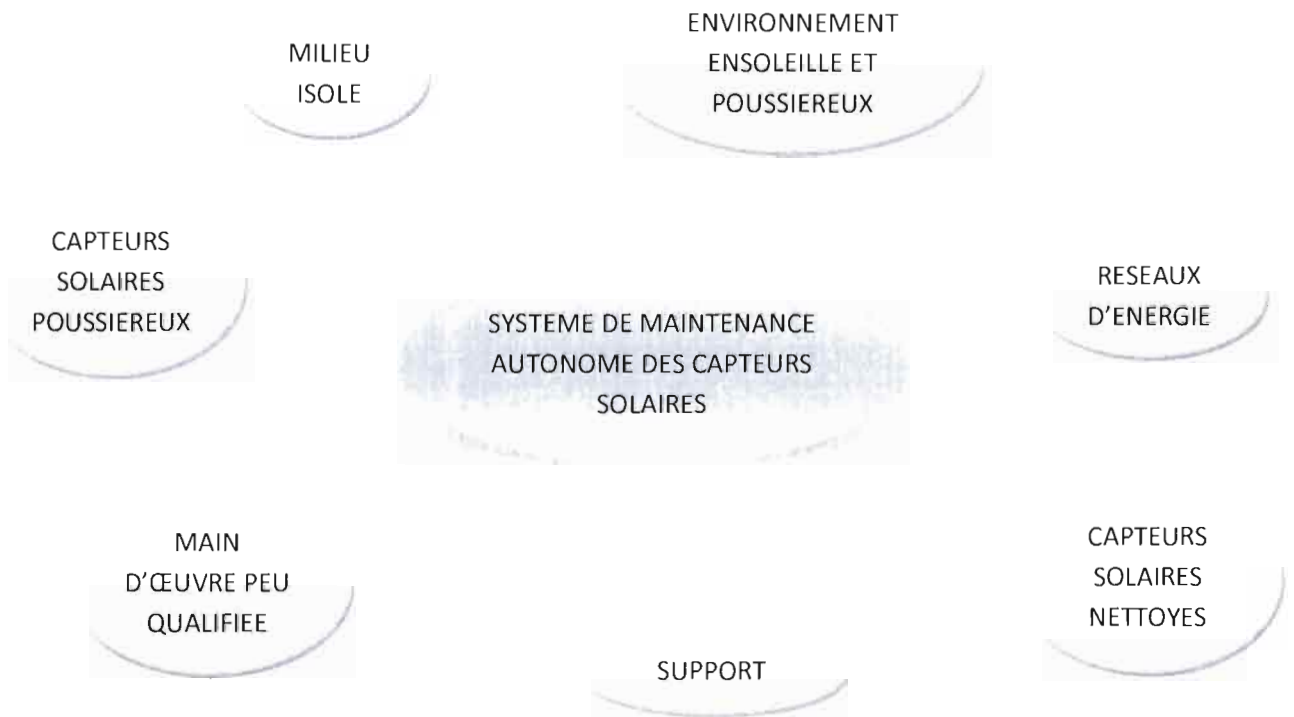


Figure 3.1 : Interacteurs du système

1.2.2. Identification des fonctions de service

Les fonctions de service sont identifiées par la recherche systématique des relations entre interacteurs pour aboutir au diagramme des interacteurs, ou « diagramme pieuvre ». Chaque fonction, principale ou contrainte, est nommée en fonction des interacteurs qu'elle relie. On distingue, par convention :

- Les fonctions principales (FP), qui expriment les relations entre deux ou plusieurs interacteurs, par l'intermédiaire de l'équipement ;
- Les fonctions contraintes (FC), relations entre le système et un interacteur.

On trouvera à la figure 3.2 ci –dessous les fonctions de service du système de maintenance des capteurs solaires.

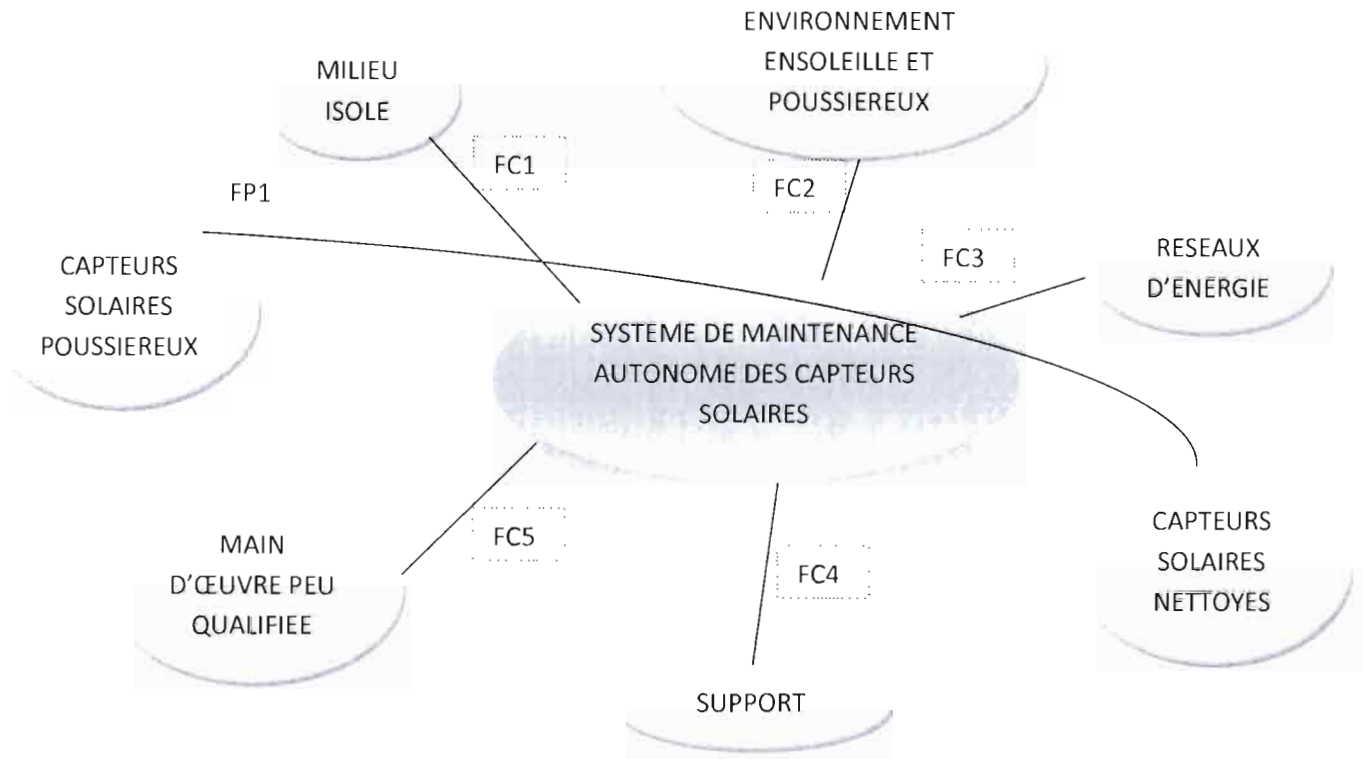


Figure 3.2 : Fonctions de service du système

FP1 : Nettoyer les capteurs solaires

FC1 : Pouvoir se déclencher automatiquement

FC2 : Résister à l'environnement et ne pas le polluer

FC3 : Etre alimenté en énergie

FC4 : Etre maintenu solidement par le support

FC5 : Etre commandé manuellement par l'utilisateur

Remarques :

- La fonction de service principale FPI correspond à la fonction globale du système de maintenance. Elle agit directement sur les capteurs solaires : c'est la fonction opérative. FPI est automatisée.
- Les fonctions contraintes FC3 et FC5 sont des fonctions participant à la commande du système (respectivement fonction d'alimentation du système et fonction de dialogue) ; on les qualifie de fonctions de commande.
- La fonction contrainte FC2 est une fonction d'environnement : elle influe sur le choix des solutions techniques et des constituants du système.
- La fonction contrainte FC1 est une fonction d'usage qui participe au mode de fonctionnement et à l'automatisation du système.
- La fonction contrainte FC4 est une fonction de sécurité agissant sur le système.

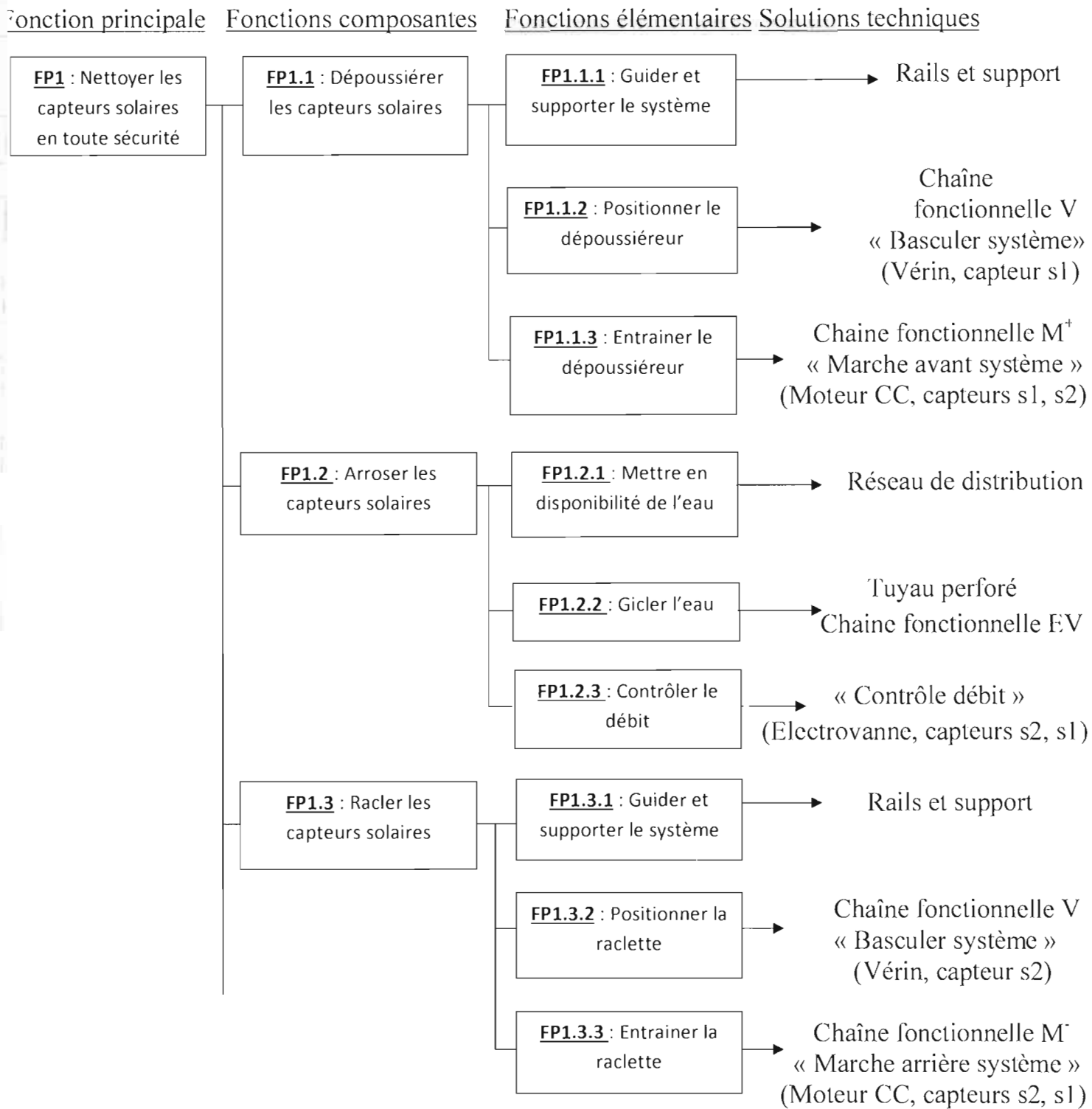
2. Analyse fonctionnelle du système

Deux modèles peuvent être utilisés pour représenter le résultat de l'analyse fonctionnelle « descendante » d'un système automatisé existant :

- ✓ **Le modèle FAST** (Function Analysis System Technic).
- ✓ **Le modèle SADT** (Structured Analysis for Design and Technic).

Nous avons à la figure 3.3 ci-dessous la représentation FAST du système de maintenance.

Le modèle FAST



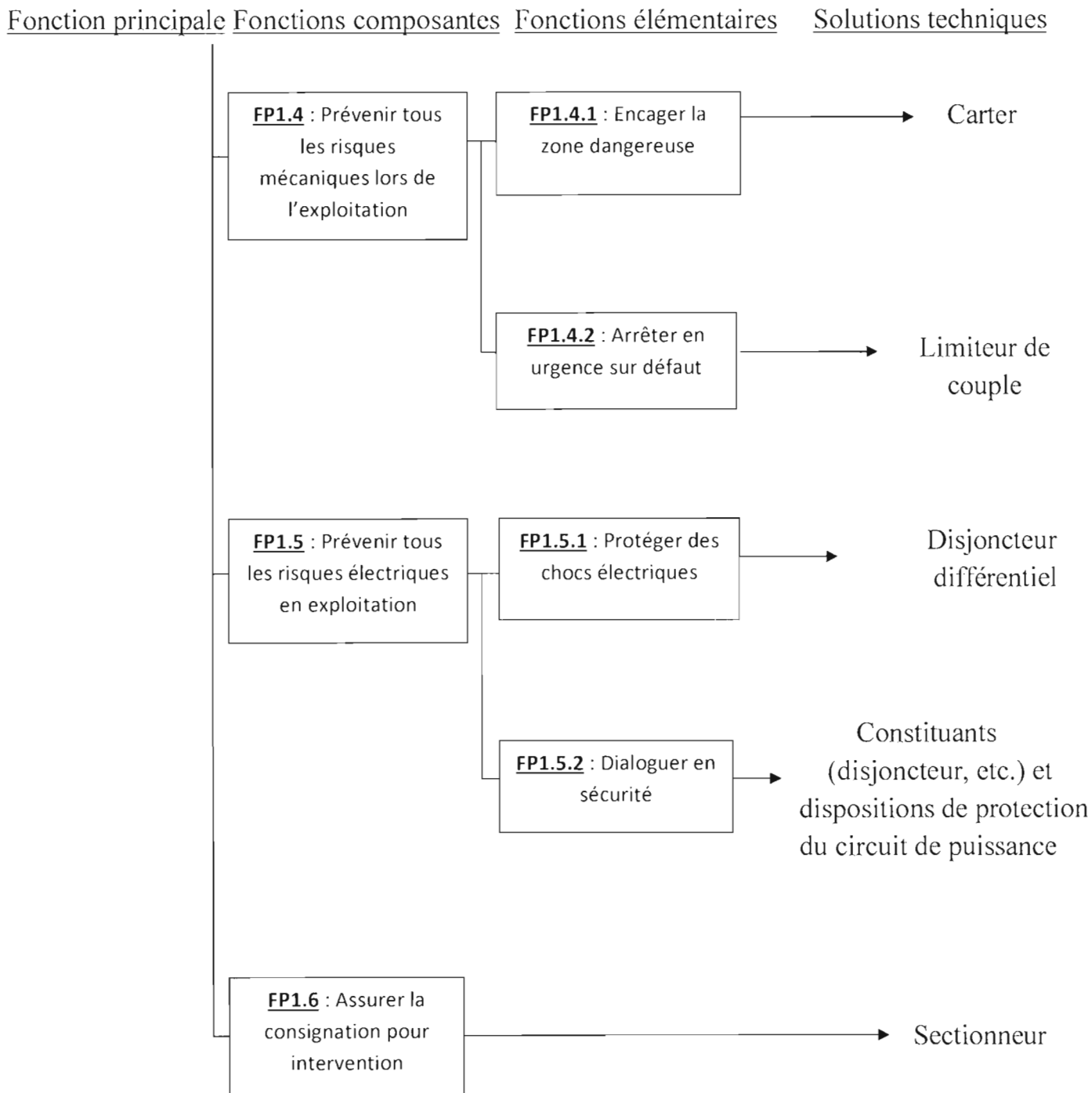


Figure 3.3 : Représentation FAST du système

3. Présentation globale du système de maintenance

Le système de maintenance des cellules photovoltaïques, dans sa globalité sert à nettoyer de façon régulière la surface des cellules photovoltaïques d'une installation photovoltaïque. Il est constitué essentiellement d'un tambour servant à dépoussiérer les plaques solaires et d'une raclette qui, accompagnée d'un système d'arrosage, les nettoie. Le tout se déplace par le biais d'un motoréducteur alimenté en courant continu.

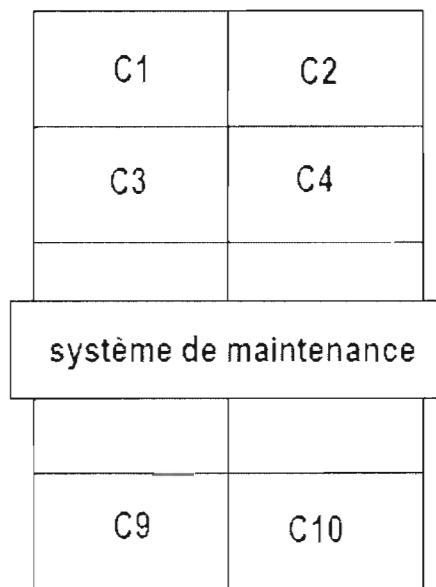


Figure 3.4 : Déplacement du système sur des panneaux solaires

4. Présentation schématique du système de maintenance retenu

4.1. Schéma cinématique

Le schéma cinématique est une représentation modélisée du mécanisme. Il nous permet de comprendre le fonctionnement du mécanisme.

Le schéma cinématique du système de maintenance est représenté sur la figure 3.5 suivante.

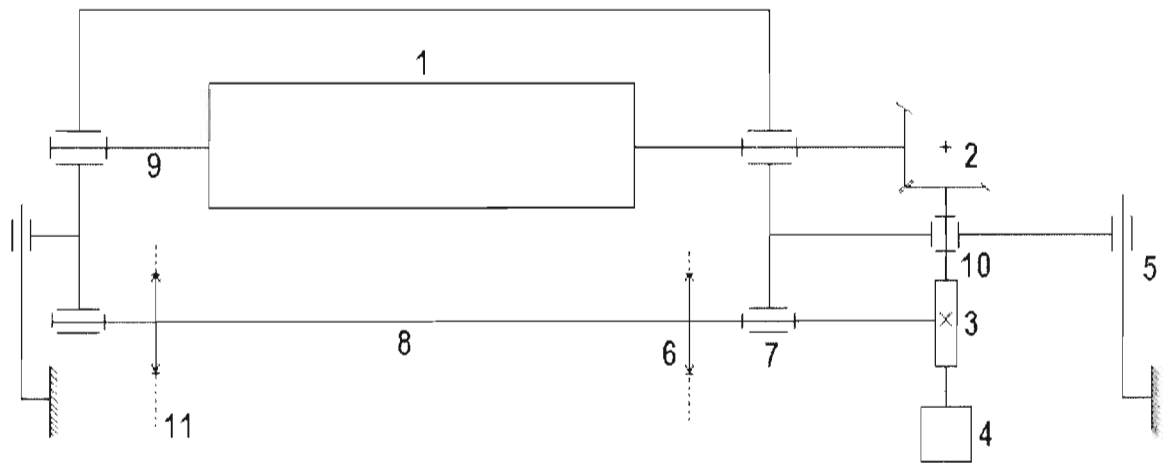


Figure 3.5 : Schéma cinématique du système

4.2. Nomenclature

Tableau 3.1 : Nomenclature du schéma cinématique du système

11	2	Chaîne
10	1	Arbre de la vis sans fin
9	1	Arbre du tambour
8	1	Arbre des roues dentées
7	5	Pivot
6	2	Pignons
5	2	Tige de glissière
4	1	Moteur à CC
3	1	Engrenage gauche
2	1	Engrenage concourant
1	1	Tambour
Repère	Nombre	Désignation

4.3. Description du fonctionnement

Le système mécanique étudié est représenté par le schéma cinématique ci-dessus. Le mouvement d'entrée est une rotation continue de l'arbre (10) de la pièce (3) imposée par un motoréducteur. La pièce (3) est en liaison pivot avec les pièces (2) et (6). Le système est contraint de se déplacer par une liaison glissière avec le bâti. La pièce (1) est entraînée par la pièce (2) par l'intermédiaire d'une liaison pivot.

4.4. Paramètres cinématiques

Tableau 3.2 : Paramètres cinématiques du système

Pignon des chaines	Dp (diamètre pignon)	190.99 mm
Roue	Dr (diamètre roue)	40.22 mm
Vis sans fin	Dv (diamètre vis)	9.57 mm
	Lv (longueur vis)	15.79 mm
	d_{arbv} (diamètre arbre vis)	10 mm
Tambour	Dt (diamètre tambour)	90 mm
	Lt (longueur tambour)	1640 mm
	d_{arbt} (diamètre arbre tambour)	10 mm
Roues coniques	Drc (diamètre roues coniques)	30 mm

5. Etudes technologiques

5.1. Présentation des solutions technologiques retenues

Les solutions technologiques retenues du système sont :

- ✓ L'utilisation d'un moteur accouplé à un réducteur et alimenté en courant continu ;

- ✓ A la sortie du motoréducteur, la transmission est réalisée à l'aide d'une vis à un filet engrenant avec une roue dentée pour réduire à nouveau la vitesse de rotation du moteur ;
- ✓ Le déplacement du système est assuré par deux pignons qui roulent sur des chaînes guidées en translation ;
- ✓ L'utilisation d'engrenages à axes concourants pour transmettre le mouvement de la vis sans fin à l'arbre du tambour.

5.2. Dessin d'ensemble

On le définit par la représentation d'un mécanisme complet (ou partiel) permettant de situer chacune des pièces qui le composent. La figure 3.6 ci-jointe représente le dessin d'ensemble du système.

5.3. Nomenclature

Tableau 3.3 : Nomenclature du dessin d'ensemble

38	1	PANNEAU SOLAIRE		
37	1	CACHE TAMBOUR		
36	1	FLANC DROIT		
35	1	SUPPORT DE TAMBOUR		
34	1	AXE DE TAMBOUR		
33	1	AXE CREUX DE TAMBOUR		
32	1	TAMBOUR		
31	2	TIGE		
30	1	RACLETTE		
29	1	CARTER P10		
28	2	SUPPORT DE CHAINE		
27	1	GLISSIERE DROITE		
26	2	SUPPORT		
25	1	GLISSIERE GAUCHE		
24	1	CARTER P9		
23	1	AXE TAMBOUR		
22	1	ENTRETOISE 3		
NOMBRE	QUANTITE	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATIONS

22

21

1

20

8

2

36

11

4

5

A

3

15

7

6

14

24

1:5



SMCP

ESP THIES

3

S. FAYE 25-12-2009

21	1	ENTRETOISE 2		
20	1	FLANC GAUCHE		
19	1	FLASQUE 1		
18	1	ENTRETOISE 1		
17	1	AXE DE PIGNON 1		
16	1	CARTER P1		
15	1	CARTER P5		
14	1	CARTER P4		
13	2	CARTER P3		
12	2	FLASQUE A		
11	1	CARTER ROUE VSF		
10	1	ENTRETOISE		
9	1	AXE CREUX PIGNON		
8	1	AXE DE PIGNON		
7	1	COUVERCLE		
6	1	CAGE ROULEMENT2		
5	1	CALE		
4	1	CARTER VIS		
3	1	CAGE ROULEMENT 1		
2	1	BRIDE		
1	1	VIS SANS FIN		
NOMBRE	QUANTITE	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATIONS

5.4. Description

A l'intérieur du boîtier de motorisation, un moteur à CC est accouplé à un réducteur à roue et vis sans fin pour former un motoréducteur. L'arbre de la vis sans fin de l'engrenage gauche est complètement lié à l'axe de sortie du réducteur et aussi, par l'intermédiaire d'une liaison pivot, à une roue dentée de l'engrenage concourant.

Le déplacement du système est assuré par le roulement des pignons sur des chaînes guidées en translation. Et ces pignons sont entraînés par le motoréducteur par l'intermédiaire d'une liaison pivot liée en amont à la roue dentée de l'engrenage gauche.

Le tambour est aussi entraîné par le motoréducteur par l'intermédiaire des liaisons pivot liées à l'engrenage concourant et par suite à la vis sans fin de l'engrenage gauche.

Les glissières servent de support et de guide au système.

5.5. Caractéristiques techniques

5.5.1. Aspect géométrique

Tableau 3.4 : Caractéristiques géométriques du système

Pignons des chaines	D_p (diamètre pignons)	190.99 mm
	z_p (nombre de dents pignons)	75
	P_p (pas pignons)	8
Roue	D_r (diamètre roue)	40.22 mm
	z_r (nombre de dents roue)	40
	a (entraxe)	24.89 mm
	m (module roue)	1 mm
	β_r (angle d'hélice)	6°
Vis sans fin	D_v (diamètre vis)	9.57 mm
	z_v (nombre de dents vis)	1
	L_v (longueur vis)	15.79 mm
	β_v (angle d'hélice)	15.79 mm
	d_{arbv} (diamètre arbre vis)	10 mm
Tambour	D_t (diamètre tambour)	90 mm
	L_t (longueur tambour)	1640 mm
	d_{arbt} (diamètre arbre tambour)	10 mm
Roues coniques	d (diamètre primitif roues)	30 mm
	b (largeur de denture)	3 mm
	z_{rc} (nombre de dents)	30
	m_{rc} (module réel)	1 mm
	δ (angle primitif)	45°

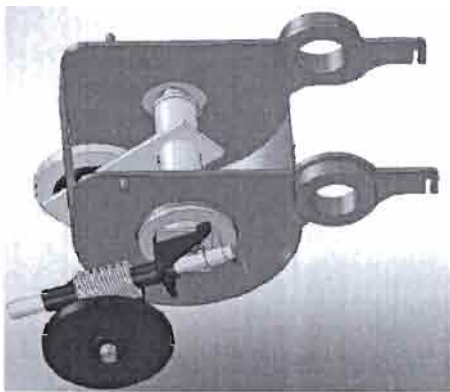
5.5.2. Aspect cinématique

Les performances principales de tout système mécanique sont sa vitesse, l'effort qu'il peut exercer et sa puissance. Par conséquent le système a une vitesse de déplacement de 30 mm/s. Sa force de pression ainsi que sa puissance seront déterminées dans les suivants chapitres.

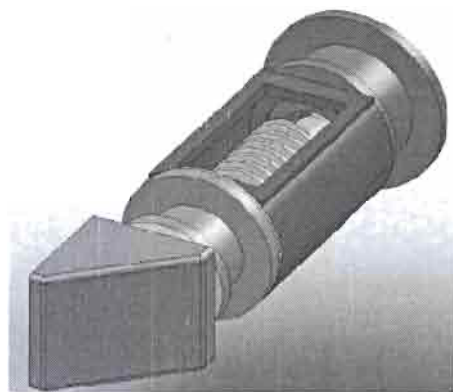
Il existe naturellement d'autres caractéristiques pour apprécier les performances du système, notamment :

- ✓ la transmission par un engrenage hélicoïdal donne une solution simple pour un grand rapport de réduction ($R = 4$), avec un fonctionnement peu bruyant ;
- ✓ la vitesse de rotation de l'arbre du motoréducteur est égale à celle du tambour ($\omega_t = 120$ tours par minute).

6. Visualisation en 3D des sous-ensembles



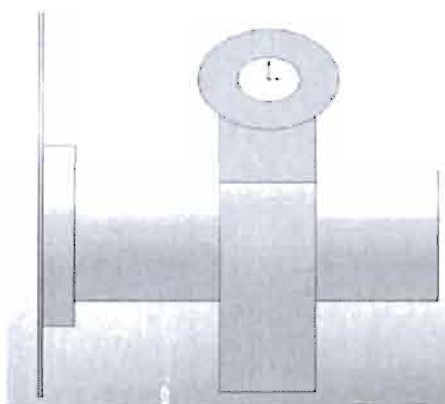
Sous ensemble 1



Sous ensemble 2



Sous ensemble 3



Sous ensemble 4

Figure 3.7 : Sous-ensembles du système

Chapitre 4 : Commande – Automatisation du système

1. Un système automatisé : trois points de vue

1.1. Définition d'un système automatisé [7]

Un système automatisé peut, sur le plan technique, être observé et défini de trois manières.

✚ **Par les fonctions de service** qu'il assure, fonctions qui s'exercent vis-à-vis des matières d'œuvre et de l'environnement humain, physique et informel. Ces fonctions sont l'expression du besoin, le **pourquoi** auquel le système satisfait.

✚ **Par sa structure**, c'est-à-dire la manière dont les différents constituants matériels et logiciels qui le composent (les effecteurs, les actionneurs, les préactionneurs, les capteurs, l'automate programmable, le pupitre de dialogue) sont organisés et reliés topographiquement pour réaliser les fonctions.

✚ **Par les tâches effectuées** pour assurer les fonctions, tâches qui se manifestent lors du fonctionnement du système par la succession chronologique des actions effectuées en fonction des informations reçues.

Structures et tâches expriment **comment** les fonctions sont réalisées dans l'espace et dans le temps.

1.2. Modèles de représentation d'un système automatisé [7]

Pour représenter un système automatisé, il faut utiliser des modèles de représentation adaptés à chacun des points de vue précédents.

Il existe une grande variété de modèles et d'outils de représentation, ainsi que la montre la figure 4.1 ci-dessous. Chacun présente des avantages et un champ d'utilisation propre.

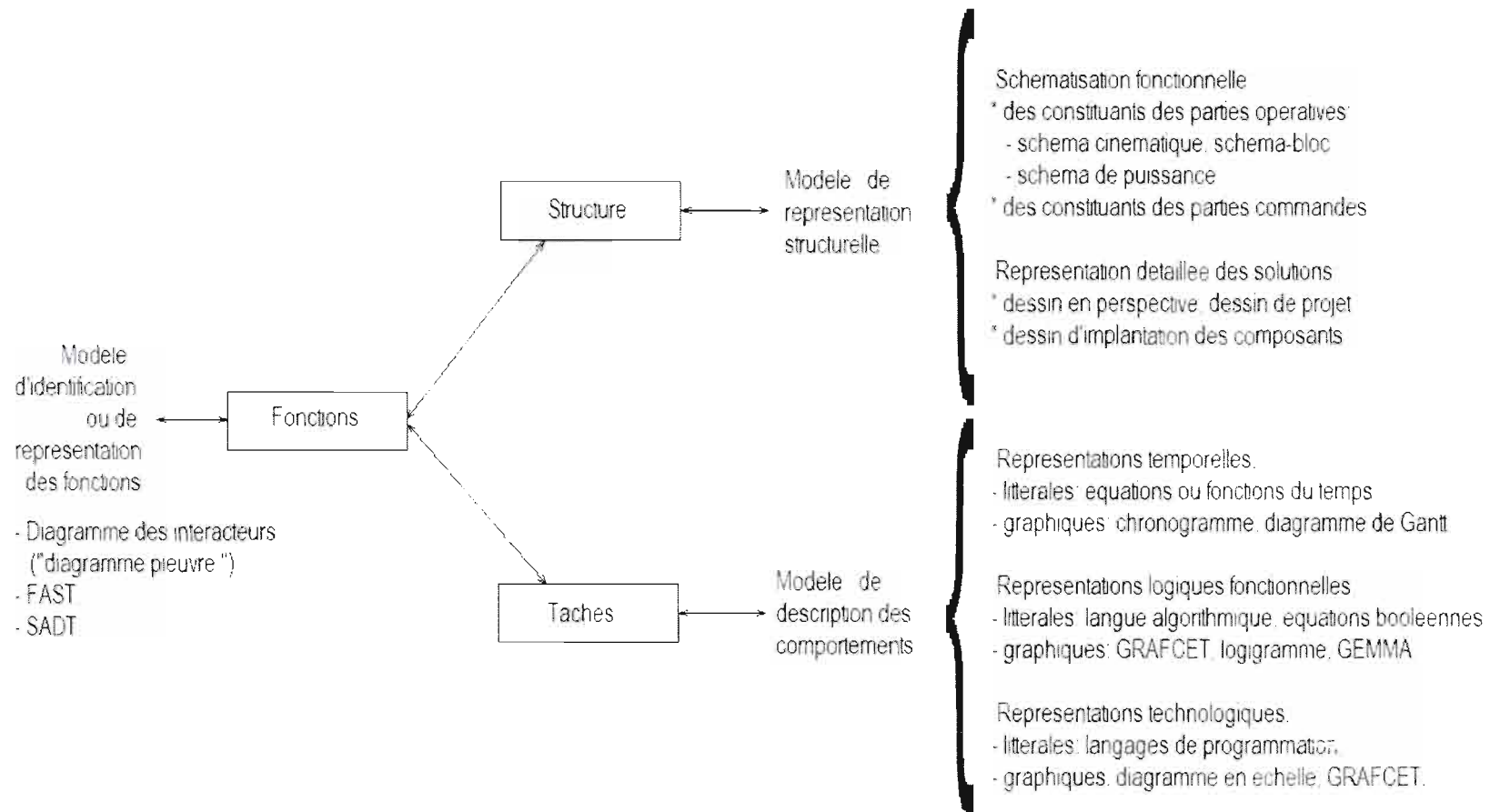


Figure 4.1 : Modèles de représentation

2. Présentation du process

2.1. Description fonctionnement

Le système fonctionne en mode automatique suivant le cycle d'une minuterie ou en mode manuelle lorsqu'on appuie sur le bouton poussoir «départ de cycle» si les commutateurs respectifs sont sur la position Marche et la position Automatique, suivant les trois étapes suivantes :

A. **Marche avant du système** : Initialement le système doit être sur la position Automatique c'est-à-dire satisfaire aux conditions de marche automatique suivantes :

- le tambour est en position de dépoussiérage,
- le vérin n'est pas alimenté,
- le moteur est à l'arrêt,
- le système est à la position SI,
- le système est en phase de temporisation pour une durée réglable.

Un ordre de mise en marche par minuterie ou par appuie sur le bouton poussoir «départ de cycle» provoque l'alimentation du moteur, celui-ci tourne dans le sens avance à la fin de la première temporisation $T1=5s$; le système avance jusqu'à actionner la fin de course.

B. **Basculement du système** : Arrivée à la fin de la marche « avance » du système, une bobine enroulée autour d'un circuit magnétique est alimentée. Ceci a pour but de créer une force électromagnétique qui provoque la sortie de la tige du vérin en attirant sa partie mobile : le système se bascule. Donc la raclette est en contact avec la plaque solaire. Parallèlement, de l'eau provenant du réseau de distribution est mise en disponibilité par le biais d'une électrovanne pour assurer l'arrosage des plaques solaires.

C. **Marche arrière du système** : Le moteur de nouveau alimenté, tourne dans le sens arrière et la vanne d'arrosage s'ouvre en même temps. Le système recule jusqu'à actionner la fin de course : le moteur s'arrête, la vanne d'arrosage se ferme et la tige du vérin rentre. Le système retourne à sa position initiale.

2.2. Le grafcet du cycle

2.2.1. Définition d'un grafcet [8]

Le GRAFCET est un outil graphique qui permet de décrire le fonctionnement d'un automatisme séquentiel. Il peut être utilisé pour représenter l'automatisme dans toutes les phases de conception : de la définition du cahier des charges, à la mise en œuvre (programmation d'automate programmable industriel, utilisation de séquenceurs ou autres technologies) en passant par l'étude des modes de marches et d'arrêts.

Le GRAFCET repose sur l'utilisation d'instructions précises, l'emploi d'un vocabulaire bien défini, le respect d'une syntaxe rigoureuse, et l'utilisation de règles d'évolutions. Il permet, entre autre, d'aborder une démarche progressive dans l'élaboration de l'automatisme. Il décrit les relations entre les sorties et les entrées booléennes du système de commande.

Le GRAFCET peut être utilisé aussi bien pour décrire l'aspect fonctionnel d'un automatisme que pour le définir dans le détail en tenant compte des technologies utilisées. Ces utilisations donnent respectivement des grafkets de niveau 1 et de niveau 2.

2.2.2. Grafcet fonctionnel du système

Ce grafcet décrit ci-dessous (figure 4.2) tient compte exclusivement de l'aspect fonctionnel du cahier des charges. Il représente le fonctionnement indépendamment de la technologie utilisée avec du texte.

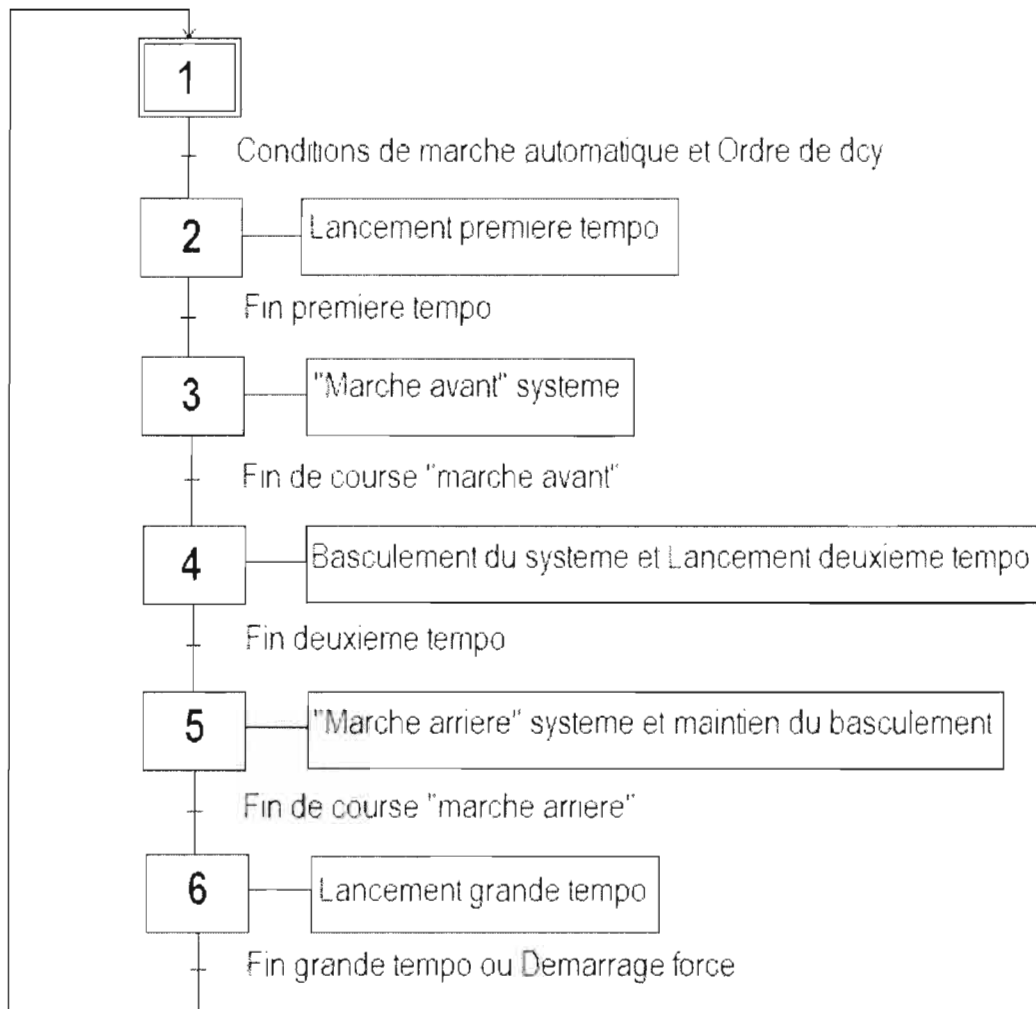


Figure 4.2 : Grafcet fonctionnel du système

2.2.3. Grafcet technologique du système

Afin de mettre en œuvre le grafcet de niveau 1 décrivant le fonctionnement de l'installation, celui-ci est transformé en un grafcet plus technique qui tient compte, entre autres :

- de l'aspect fonctionnel du cahier des charges ;
- de la technologie de la partie opérative ;

- de la technologie de la partie commande ;
- de la nature des capteurs utilisés ;
- du mode de traitement de l'information.

La figure 4.3 ci-dessous représente le grafcet de niveau 2.

Actionneurs

- M+ : moteur en "marche avant"
- M- : moteur en "marche arrière"

Preactionneurs

- D: bouton poussoir (demarrage du systeme)

Capteurs

- s1 : capteur de position
- s2 : capteur de position

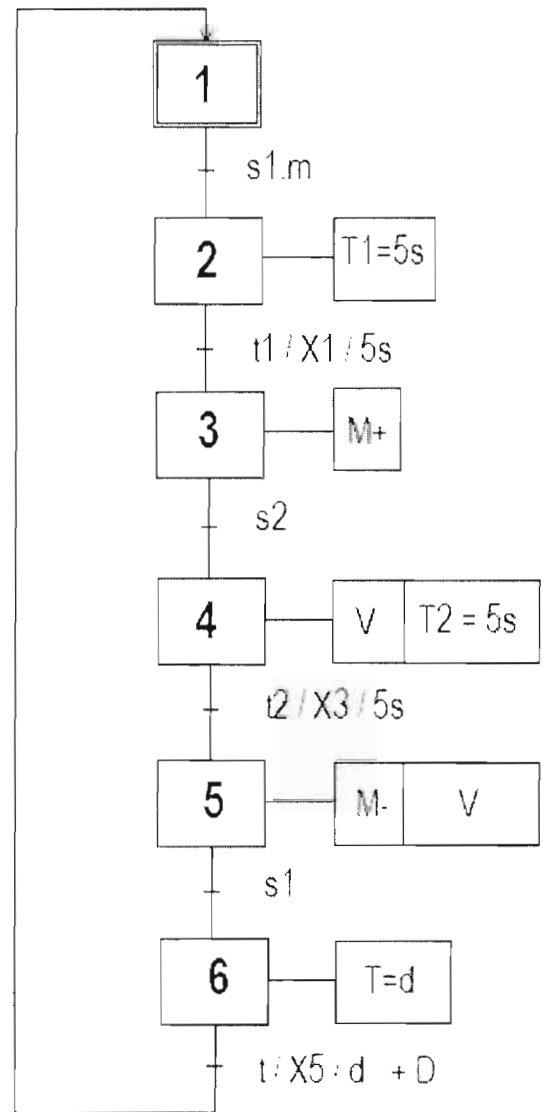


Figure 4.3 : Grafcet technologique du système

2.2.4. Réalisation par câblage

Pour mettre en œuvre le grafctet ainsi élaboré, nous utilisons des composants d'électronique ToR (portes et bascules).

2.2.4.1. Câblage des étapes du grafctet

Le grafctet étant linéaire, il suffit alors d'utiliser une bascule RS par étape. Une étape est allumée si l'étape précédente est active et que la réceptivité d'entrée est vraie. Dans ce cas on désactivera une étape quand la suivante est active ou bien lorsqu'il ya arrêt du système (matérialisé par RAZ). Ceci simplifie le câblage, mais ne respecte pas toutes les règles du grafctet (en fait cette méthode fonctionne dans une très grande majorité de cas). La condition d'activation d'une étape et celle de désactivation sont alors respectivement câblées sur le SET et sur le RESET.

Notons pour une étape quelconque de numéro i , son entrée SET par S_i , son entrée RESET par R_i .

La figure 4.4 suivante illustre le câblage des différentes étapes du grafctet.

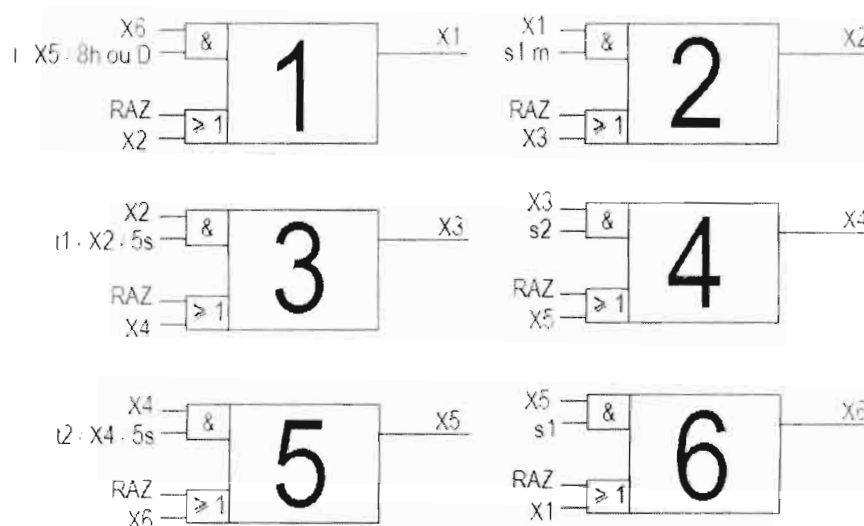


Figure 4.4 : Schéma de câblage des étapes du grafctet

Tableau 4.1 : Conditions d'activation et de désactivation des étapes

6	X6. (t / X6 / d + D)	RAZ + X2
5	X1. s1. m	RAZ + X3
4	X2. (t1 / X3 / 5s)	RAZ + X4
3	X3. s2	RAZ + X5
2	X4. (t2 / X5 / 5s)	RAZ + X6
1	X5. s1	RAZ + X1
Xn	CAXn	CDXn

2.2.4.2. Câblage du grafcet

Pour obtenir le schéma de câblage du système, il suffit alors de relier successivement les différentes étapes du grafcet. Cela nous permet d'obtenir la figure 4.5 ci-jointe.

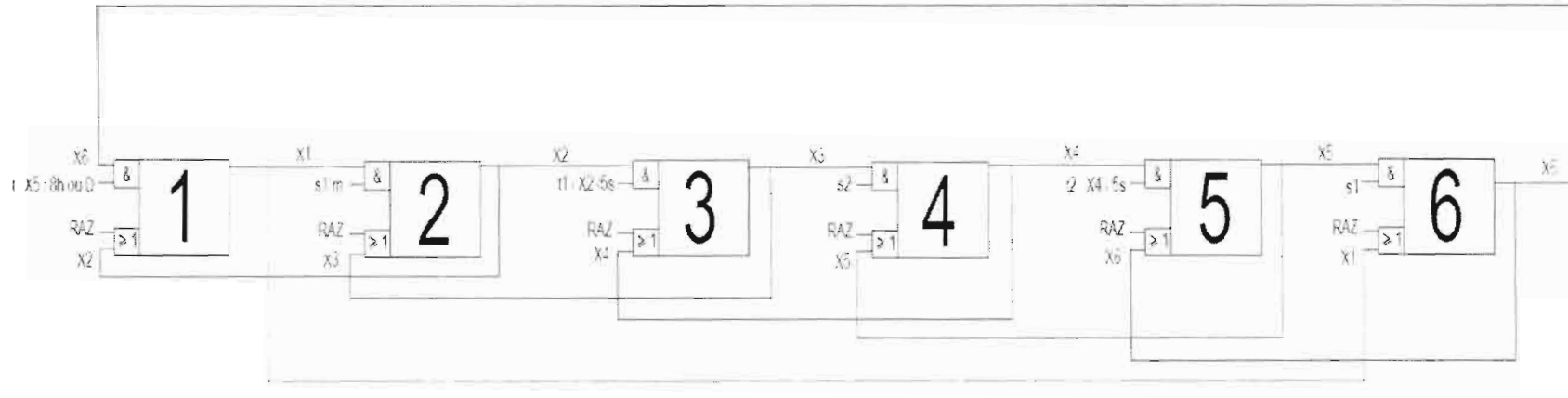


Figure 4.5 : Schéma de câblage du grafset

2.2.5. Réalisation de mémoires par automaintien [8]

En logique câblée électrique, on utilise pour réaliser la fonction mémoire un relais branché en automaintien.

Le relais est un composant électrique qui permet de commuter un circuit dit de puissance lorsqu'un autre circuit dit de commande est alimenté en aucune liaison mécanique (utilisation d'un champ magnétique). Il permet de mémoriser l'état d'un circuit de commande en mode « Marche ou Arrêt ».

Le circuit commande est composé d'une bobine électromagnétique qui génère un champ magnétique permettant de fermer ou d'ouvrir des contacts.

Le circuit puissance est composé d'un ou de plusieurs contacts NF ou NO qui changent d'état quand la bobine est alimentée.

On distingue deux modes de fonctionnement de la fonction mémoire :

- fonction mémoire à activation prioritaire ;
- fonction mémoire à désactivation prioritaire.

Les fonctions mémoires des étapes du système sont à activation prioritaire.

2.2.5.1. Réalisation électrique câblée des étapes

Prenons par exemple l'étape 2 du système pour illustrer la réalisation de la commande du moteur du système. La même technique est utilisée pour réaliser le circuit d'alimentation du système.

La mise en tension électrique est obtenue après la fin de la première temporisation de l'étape 1 si l'autre condition l'autorise, KM4 fermé, provoquant ainsi l'alimentation du relais KM3 et son automaintien par l'intermédiaire du contact KM3 câblé en parallèle avec t1 et KM2.

La désactivation est obtenue par ouverture du contact placé en série (KM4).

D'une manière générale, il faut retenir que :

- Les contacts autorisant la marche sont des contacts à établissement de circuit et sont montés en parallèle ;
- Les contacts provoquant l'arrêt sont des contacts à interruption de circuit et sont montés en série ;
- L'effet mémoire est obtenu à partir de l'alimentation de la bobine par l'intermédiaire de l'un de ses propres contacts ;
- La mémoire réalisée est une mémoire à activation prioritaire.

Nous avons à la figure 4.6 ci-dessous le câblage des différentes étapes du système.

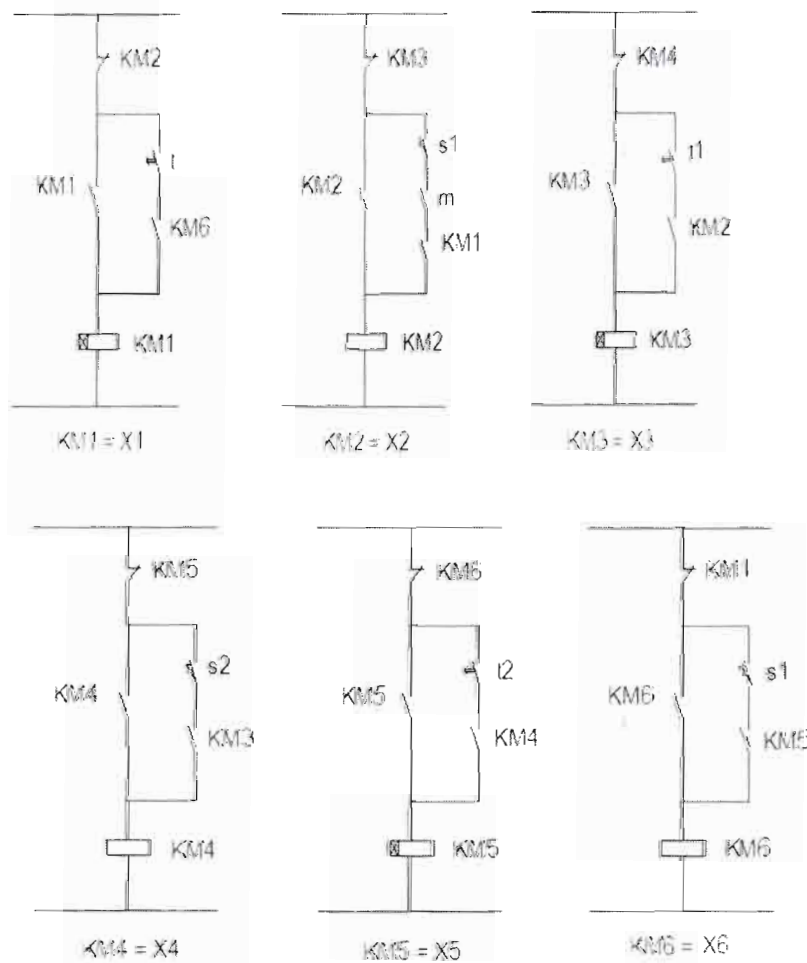


Figure 4.6 : Câblage électrique des étapes du grafset

2.2.5.2. Réalisation électrique câblée du système

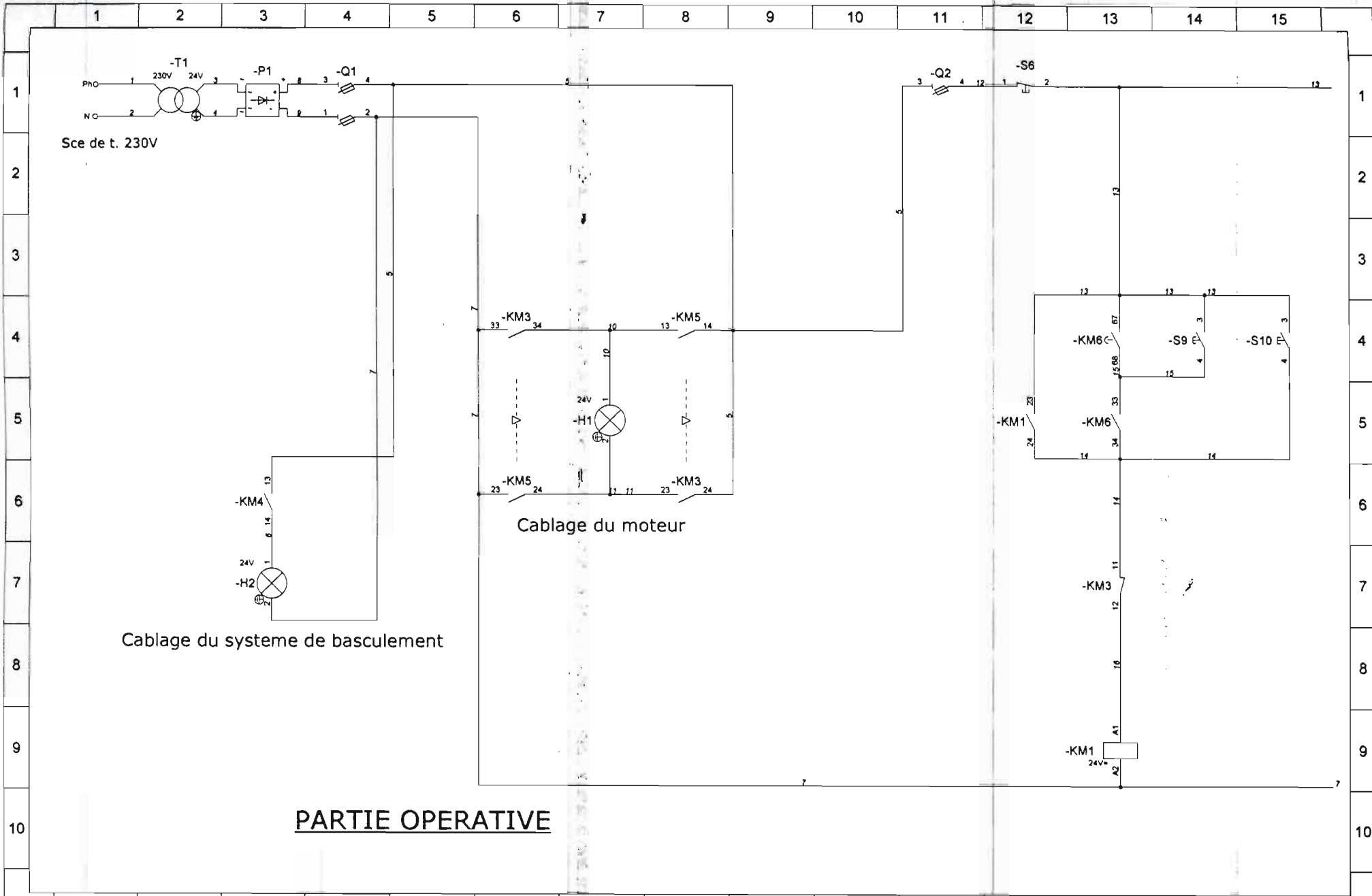
On retrouvera à la figure 4.7 ci-jointe le câblage électrique du système.

2.2.5.3. Nomenclature

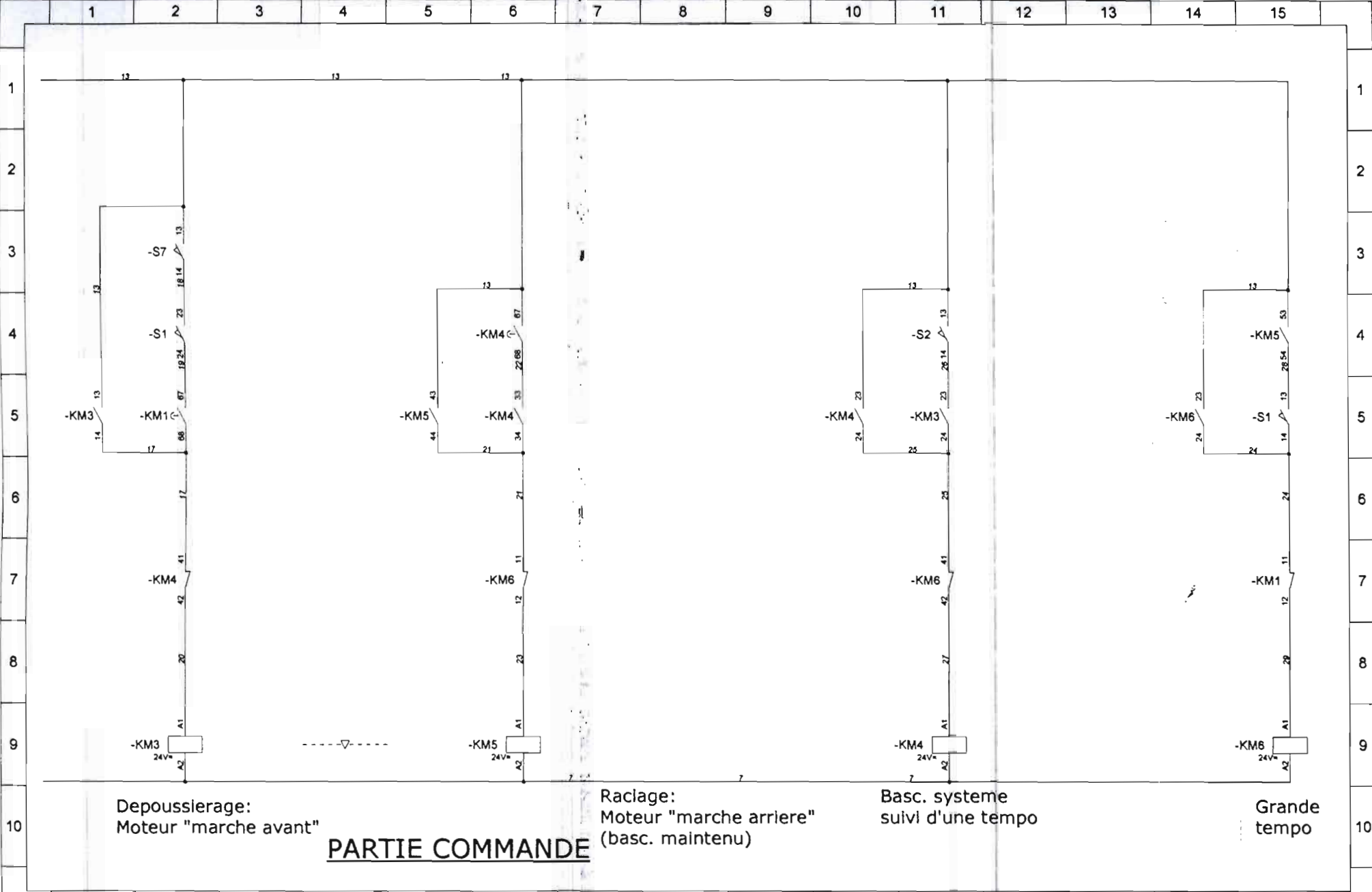
Tableau 4.2 : Nomenclature du schéma électrique du système

Q2	1	Fusible-sectionneur unipolaire	assure la protection des circuits
M	1	Moteur à courant continu	assure le déplacement du système
V	1	Vérin à simple effet à commande électrique	assure le basculement du système
S9	1	Bouton poussoir NO	assure le démarrage manuel du système
S6	1	Bouton poussoir NF	assure l'arrêt d'urgence du système
S7	1	Interrupteur	assure le départ de cycle
S1 et S2	2	Interrupteur de position NO	indiquent respectivement les fins de courses « arrière » et « avant »
D	1	Disjoncteur unipolaire	protège les lignes de courant
Bobine 24V KM6	1	Contacteur auxiliaire 2NO 2NF	permet de commander l'ouverture et la fermeture du circuit de puissance
Bobine 24V KM6	1	Contacteur temporisé additionnel	permet d'établir ou d'ouvrir un contact un certain temps-réglable
Bobine 24V KM1	1	Contacteur auxiliaire 1NO 1NF	permet de commander l'ouverture et la fermeture du circuit de puissance
Repère	Nombre	Désignation	Rôle

Bobine 24V KM1	1	Contacteur temporisé additionnel	permet d'établir ou d'ouvrir un contact un certain temps-réglable
Bobine 24V KM3	1	Contacteur auxiliaire 4NO	permet de commander l'ouverture du circuit de puissance
Bobine 24V KM3	1	Contacteur auxiliaire 1NO 1NF	permet de commander l'ouverture et la fermeture du circuit de puissance
Bobine 24V KM4	1	Contacteur auxiliaire 2NO	permet de commander l'ouverture du circuit de puissance
Bobine 24V KM4	1	Contacteur auxiliaire 1NO 1NF	permet de commander l'ouverture et la fermeture du circuit de puissance
EV	1	Electrovanne	assure l'arrosage
Bobine 24V KM4	1	Contacteur temporisé additionnel	permet d'établir ou d'ouvrir un contact un certain temps-réglable
Bobine 24V KM5	1	Contacteur auxiliaire 4NO	permet de commander l'ouverture du circuit de puissance
Repère	Nombre	Désignation	Rôle



PARTIE OPERATIVE



LEGENDE

T1:Tranformateur 230/24V

P1:Pont redresseur 24V~/24V=

Q1:Fusibles-Sectionneur bipolaire

H2,H1:Voyant 24V(respectivement Verin V et moteur)

Q2:Fusible-Sectionneur unipolaire

S6:Bouton poussoir NF(Arret d'urgence)

S9,S10:Bouton poussoir NO (Demarrage du systeme)

S7:Depart de cycle

S1:Interrupteur de position NO(fin de course "marche arriere")

S2:Interrupteur de position NO(fin de course "marche avant")

Bobine 24V KM6 :

- 2 contacts NO
- 2 contacts NF
- 1 contact NO temporise

Bobine 24V KM1 :

- 1 contact NO
- 1 contact NO temporise
- 1 contact NF

Bobine 24V KM3 :

- 5 contacts NO
- 1 contact NF

Bobine 24V KM4 :

- 3 contacts NO
- 1 contact NF
- 1 contact NO temporise

Bobine 24V KM5 :

- 4 contacts NO

NOMENCLATURE

- 1 F-L-C (2-9-4)
- 2 F-L-C (1-5-8)
- 3 F-L-C (1-5-6)
- H 1 F-L-C (1-5-7)
- H 2 F-L-C (1-7-3)
- KM1 F-L-C (1-5-12)(1-9-13)(2-5-2)(2-7-15)
- KM3 F-L-C (1-4-6)(1-6-8)(1-7-13)(2-5-1)(2-9-2)(2-5-11)
- KM4 F-L-C (1-6-3)(2-7-2)(2-4-6)(2-5-6)(2-5-10)(2-9-11)
- KM5 F-L-C (1-6-6)(1-4-8)(2-5-5)(2-9-6)(2-4-15)
- KM6 F-L-C (1-4-13)(1-5-13)(2-7-6)(2-7-11)(2-5-14)(2-9-15)
- P 1 F-L-C (1-1-3)
- Q 1 F-L-C (1-1-4)
- Q 2 F-L-C (1-1-11)
- S 1 F-L-C (2-4-2)(2-5-15)
- S 10 F-L-C (1-4-15)
- S 2 F-L-C (2-4-11)
- S 6 F-L-C (1-1-12)
- S 7 F-L-C (2-3-2)
- S 9 F-L-C (1-4-14)
- T 1 F-L-C (1-1-2)

(F-L-C) F: Folio L: Ligne C: Colonne

Nom: FAYE

Prénom: Saliou

Date: 30/07/2009

Folio: Nomenclature

SCHEMAPLIC 2.5 Energétique Schéma: Cablage électrique du système (pfe.sch)

Calculons l'énergie cinétique de S1 :

$$Ec1_{totale} = \frac{1}{2} (J_{vis} + J_2) \omega_m^2 + \frac{1}{2} J_2' \omega_{2'}^2 + \frac{1}{2} J_1 \omega_{2'}^2 \quad (1)$$

Avec Ec : Energie cinétique

J : Moment d'inertie

ω : vitesse de rotation

En tenant compte du rapport de réduction i , nous avons :

$$i = \frac{\omega_{2'}}{\omega_2} = \frac{\omega_{2'}}{\omega_m}$$

Ce qui implique :

$$\omega_{2'} = \omega_2 i = \omega_m i$$

$i = 1$, car les roues 2 et 2' de l'engrenage conique sont identiques.

La relation (1) devient alors :

$$Ec1_{totale} = \frac{1}{2} (J_{vis} + J_2 + J_2' i^2 + J_1 i^2) \omega_m^2$$

Par ailleurs, nous avons :

$$Ec1_{totale} = \frac{1}{2} J_{eq1} \omega_m^2 \quad (2)$$

Par identification, nous obtenons :

$$J_{eq1} = J_{vis} + J_2 + J_2' i^2 + J_1 i^2$$

$$J_{eq1} = J_{vis} + 2J_2 + J_1 \quad (3)$$

Détermination de J_{eq2}

Le schéma équivalent reliant le moteur aux pignons est la suivante :

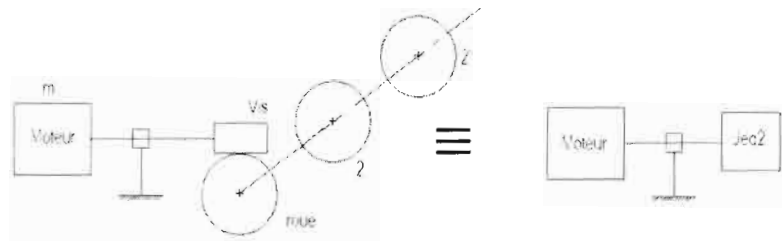


Figure 5.2 : Schéma cinématique du sous système S2

En adoptant la même démarche que précédemment, nous obtenons :

$$J_{eq2} = J_{roue} i_v^2 + 2J_p i_v^2 + M_T i_v^2 R^2 \quad (4)$$

Avec J_{roue} : moment d'inertie de la roue

J_p : moment d'inertie du pignon

$M_T = 5 \text{ Kg}$, masse totale du système

R_{roue} : rayon roue

i_v : rapport de réduction (vis-roue)

$$i_v = \frac{\omega_{vis}}{\omega_{roue}} = 4$$

Détermination de J_{eq}

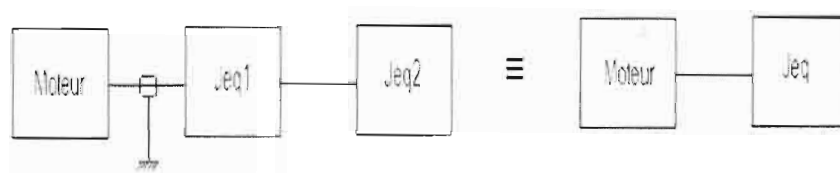


Figure 5.3 : Schéma cinématique réduit du système

D'après la figure ci-dessous, le moment d'inertie équivalent du système est :

$$J_{eq} = J_{eq1} + J_{eq2} \quad (5)$$

Hypothèse : La géométrie des pignons est assimilée à des cylindres parfaits, de hauteur égale à l'épaisseur et de diamètre égal aux diamètres primitifs. Les moments ont pour expression :

$$J = \frac{1}{2} MR^2 \quad (6)$$

Avec M désignant la masse et R le rayon.

$$M = \rho V = \rho \pi R^2 e$$

Donc

$$J = \frac{1}{2} \pi \rho e R^4$$

Le tableau suivant donne le résultat obtenu des calculs.

Tableau 5.1 : Calcul des moments d'inertie

	Masse volumique ρ (Kg/m ³)	Rayon R (m)	Epaisseur e (m)	Moment d'inertie J (Kg.m ²)
Tambour	7900	0.045	1.67	0.0845
Vis	7900	0.0048	0.016	1.03E-07
Roue	7900	0.02	0.005	1.01E-05
Roues coniques	7900	0.015	0.003	1.88E-06
Pignons	7900	0.0955	0.01	0.01

Je _{q1}	0.085 Kg.m ²
Je _{q2}	0.197 Kg.m ²
Je _q	0.282 Kg.m ²

En appliquant le théorème du moment dynamique, on obtient :

$$J_{eq} \omega' = C_m - C_r$$

Donc

$$C_m = J_{eq}\omega' + C_r \quad (7)$$

Avec C_m : couple moteur

ω' : l'accélération angulaire

C_r : le couple résistant

Calcul de l'accélération angulaire ω'

Nous avons au démarrage du système :

$$\omega_m^2 - \omega_0^2 = 2\omega'\theta \quad (8)$$

Avec $\omega_0 = 0$ rad/s

θ (angle de rotation durant le temps de démarrage $\Delta T = 0.3s$) = 25.12 rad

$\omega_m = 12.56$ rad/s

Donc

$$\omega' = \frac{\omega_m^2}{2\theta} = 3.14 \text{ rad/s}^2$$

Calcul du couple résistant C_r

On assimile le mouvement du tambour à un cylindre creux C roulant à une vitesse constante V_c sur un plan horizontal. La figure ci-dessous donne une idée sur le principe de fonctionnement.

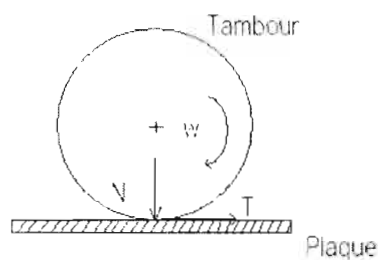


Figure 5.4 : Roulement du tambour sur la plaque

On note N l'effort normal exercé par le tambour sur la plaque, T l'effort tangentiel et f le coefficient de frottement (éponge-verre).

D'après la loi de Coulomb :

$$T = f \cdot N$$

Soient P_f et C_f respectivement la puissance et le couple développés pour vaincre ce frottement.

Nous obtenons :

$$P_f = T \cdot V_c = f \cdot N \cdot V_c \quad (9) \quad \text{et}$$

$$C_r = C_f = \frac{P_f}{\omega_t} = \frac{T \cdot V_c}{\omega_t} = \frac{f \cdot N \cdot V_c}{\omega_t} \quad (10)$$

ω_t étant la vitesse de rotation du tambour et

V_c la vitesse de déplacement du tambour

$$C_r = 3.23 \text{ N.m}$$

Donc,

Le couple moteur à vide est égal à :

$$C_{mv} = 0.89 \text{ N.m}$$

Le couple moteur en charge :

$$C_{mc} = 4.12 \text{ N.m}$$

On en déduit la puissance du moteur par la relation suivante :

$$P_m = C_{mc} \omega_m$$

$$P_m = 51.7 \text{ W}$$

Pour un rendement global du mécanisme tenant compte des différents chaînes de transmission, des frottements sur les paliers $\eta = 60 \%$, un coefficient de sécurité égal à 1.25 pour un surdimensionnement, on obtient :

$$P_m = 107.7 \text{ W}$$

1.2. Choix des roulements [9]

Un roulement est un ensemble de pièces insérées entre deux organes mobiles l'un par rapport à l'autre et destinées à remplacer un glissement par un roulement.

Un roulement est défini par deux caractéristiques essentielles : le type et les dimensions.

Le système de maintenance comporte 6 roulements : 4 pour faciliter son déplacement et 2 pour assurer le roulement du tambour. On peut dire alors que le système a deux types de roulements.

Donc dimensionner les roulements les plus sollicités revient à dimensionner l'ensemble des roulements du système puisque le diamètre des arbres est le même.

Après avoir fait une analyse du système, nous concluons que les roulements de l'arbre du tambour sont les plus sollicités. Cet arbre tourne à 120 rpm. Le roulement le plus sollicité est soumis aux conditions suivantes :

Charge radiale F_r :	44.9315083 N ;
Charge axiale F_a :	0.00000141 N ;
Durée désirée :	50 ans à 4mn/j avec 365 jours par année ;
Fiabilité :	90%.

- Choix du type de roulement :

La bague intérieure tourne car l'arbre est en rotation. Nous utilisons alors la figure 7.6 du cours des éléments de machine avec $F_a/F_r = 3.1381E-08$. Et cette figure indique qu'un **roulement à billes à gorges profondes** est le plus adéquat.

- Calcul du taux de charge dynamique C :

$$C = \text{Re} \left[\frac{N_d \times H_{10}}{33 \frac{1}{3} \times 500} \right]^{1/3} \quad \text{avec}$$

H_{10} : durée désirée pour une fiabilité de 90% ;

N_d : vitesse de rotation de l'arbre.

$$R_e = \max(V F_r, X V F_r + Y F_a) \quad \text{ou}$$

R_e charge radiale équivalente (N) ;

$V = 1$, facteur tenant compte de la bague qui tourne ;

X = facteur multipliant la charge radiale (voir annexe) ;

Y = facteur multipliant la charge axiale (voir annexe).

Application numérique

$$H_{10} = 1216.66667 \text{ h}$$

$$N_d = 120 \text{ tours/minute}$$

$$C = 92,6230404 \text{ N}$$

Caractéristiques des roulements :

Alésage : 10 mm

Diamètre extérieur : 30 mm

Largeur : 9 mm

1.3. Choix des matériaux

Après avoir défini le système et les interactions de celui-ci avec son environnement, il nous est maintenant possible d'établir un cahier des charges qui va nous guider dans le choix des matériaux du système. Nous allons dans cette partie établir une liste des exigences nécessaires au choix des matériaux.

Afin de mieux répartir ces exigences en catégories que nous traiterons sommairement, nous allons distinguer les grandes classes d'exigences pour le système avec son environnement. Les catégories principales pour un tel système sont les suivantes :

- Il y a les propriétés mécaniques qui doivent correspondre aux exigences de l'utilisation du système ;
- Au niveau des propriétés chimiques, on désire obtenir une bonne inertie avec une dégradation aussi faible que possible du système.

Les propriétés mécaniques : Dans ce domaine, les exigences sont diverses. On attend du système qu'il ait des propriétés mécaniques appropriées pour qu'il puisse fonctionner correctement. Par conséquent, nous devons connaître pour chaque pièce mobile du système : sa limite à la rupture, sa limite élastique, son module d'élasticité, sa ténacité, etc.

Les propriétés chimiques : En ce qui concerne les propriétés chimiques, elles vont être importantes principalement au niveau de la dégradation du système. En effet, le milieu du système est un milieu chaud et poussiéreux. Ce qui implique que le système doit pouvoir résister dans sa globalité à la corrosion.

Il existe naturellement d'autres exigences devant intervenir au choix des matériaux du système, notamment son coût et ses considérations esthétiques.

2. Choix des composants électriques

Tableau 5.2 : Références des composants électriques

1	Electrovanne	012636
1	Fusible-sectionneur unipolaire	15625
1	Réducteur	80 817
1	Moteur à courant continu	82 800 5
2	Interrupteur de position	XCK S101
1	Disjoncteur unipolaire	985 213 3200 (AVELTEC)
1	Interrupteur	RL 35 11-G-2
2	Boutons poussoirs (NO et NF)	1100P-B5-N/ST
1	Minuterie	TC.82 / 857
1	KM6 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif temporisé)	NE 21 E
1	KM5 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif temporisé)	NE 21 E
1	KM4 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif)	NE 21 E
1	KM3 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif)	NE 21 E
1	KM1 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif temporisé)	NE 21 E
Nombre	Désignation	Références

3. Calcul des coûts disponibles

Tableau 5.3 : Coûts des composants électriques

1	Electrovanne	70478
1	Fusible-sectionneur unipolaire	3471.5
1	Réducteur	8500
1	Moteur	17595
2	Interrupteur de position	32750
1	Disjoncteur unipolaire	15720
1	Interrupteur	1637.5
2	Boutons poussoirs (NO et NF)	10218
1	Minuterie	89931.5
1	KM6 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif temporisé)	17000 + 4000
1	KM5 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif temporisé)	17000 + 4000
1	KM4 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif)	17000 + 4000
1	KM3 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif)	17000 + 4000
1	KM1 (Contacteur auxiliaire + contacteur additif temporisé)	17000 + 4000
Nombre	Désignation	Prix (F CFA)

Coûts totaux disponibles : 355 301.5 F CFA

Conclusion partielle

Dans cette partie, une conception détaillée a été faite. Nous avons spécifié les différents composants de notre système tout en justifiant nos orientations technologiques. Cela a été justifié par la présentation des chapitres trois et quatre de ce rapport.

Le dimensionnement de l'installation nous a permis d'avoir la puissance électrique dont l'installation a besoin pour fonctionner correctement et d'une manière optimale. Il nous a aussi aidé à faire le choix des composants électriques dans des catalogues appropriés.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La production d'énergie photovoltaïque augmente de façon importante depuis plusieurs années mais son développement reste limité par son coût qui reste trop élevé par rapport aux énergies fossiles et nucléaires. Afin d'améliorer la production d'énergie photovoltaïque, nous nous sommes proposés de concevoir un système qui permet d'assurer la maintenance des cellules photovoltaïques. Ainsi la présentation d'un dossier documentaire sur les champs solaires a été abordée au préalable dans le but d'en tirer des informations récentes sur leur performance.

A cet effet, la finalité étant la conception d'un système automatique pour la maintenance des cellules photovoltaïques, le chapitre trois de ce rapport a présenté une étude des technologies liées à l'étude technologique du système.

Le quatrième chapitre a été consacré à la partie commande du système, depuis l'analyse du système dans son environnement jusqu'à la réalisation du câblage électrique.

Le dimensionnement de l'installation fait l'objet du chapitre cinq. Cependant pour que l'installation puisse fonctionner dans les conditions optimales, le choix des matériaux du système complétera l'étude.

Egalement la partie étude financière est à terminer car un projet ne peut être entamer sans que l'on ait une information sûre sur sa rentabilité.

Ceux-ci nous conduisent à dire que ce projet de conception est une étude de faisabilité nous permettant de saisir la partie énergétique du projet.

Ainsi, nous projetons une étude de marché pour pouvoir fixer le coût du produit mais aussi chercher toutes les informations nécessaires à une étude de rentabilité.

Bibliographie et webliographie

- [1] Cours d'énergies renouvelables 4^{ème} année, Mr Pape Mody Ndiaye
- [2] [http : //www.economie-energie.biz/photovoltaïque.html](http://www.economie-energie.biz/photovoltaïque.html)
- [3] [http: //www.outilssolaires.com](http://www.outilssolaires.com)
- [4] cellules solaires ed.ETSF
- [5] Sources techniques principales :
extraits des chapitres "L'énergie photovoltaïque" et "Les Installations photovoltaïques"
- [6] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche – D. Delagnes
- [7] Automatique, informatique industrielle, Christian Merlaud, Jacques Perrin, Jean-Paul Trichard, DUNOD, Paris 1995
- [8] Cours d'automatisme 4^{ème} année, Mr Daour Sène
- [9] Cours d'éléments de machine 4^{ème} année, Mr Papa Mboup

ANNEXES

ANNEXE A : Les tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de la roue (vis sans fin)

ROUES CONIQUES

Données		Dimensions				Forces								
P (W)	N (tr/mn)	α_n	δ	d	b	C	F_T	F_A	F_R	F	m	Y	Z	σ_{max} (N/mm ²)
99	120	20	45	20	3	7.88E+00	8.81E-04	2.27E-04	2.27E-04	9.38E-04	0.5	0.4339	40	1.35E-03
100	120	20	45	30	3	7.96E+00	5.71E-04	1.47E-04	1.47E-04	6.08E-04	2	0.2861	15	3.33E-04
101	120	20	45	30	3	8.04E+00	5.77E-04	1.48E-04	1.48E-04	6.14E-04	2	0.2861	15	3.36E-04
102	120	20	45	30	3	8.12E+00	5.82E-04	1.50E-04	1.50E-04	6.20E-04	2	0.2861	15	3.39E-04
103	120	20	45	30	3	8.20E+00	5.88E-04	1.51E-04	1.51E-04	6.26E-04	2	0.2861	15	3.43E-04
104	120	20	45	30	3	8.28E+00	5.94E-04	1.53E-04	1.53E-04	6.32E-04	2	0.2861	15	3.46E-04
105	120	20	45	30	3	8.36E+00	5.99E-04	1.54E-04	1.54E-04	6.38E-04	2	0.2861	15	3.49E-04
106	120	20	45	30	3	8.44E+00	6.05E-04	1.56E-04	1.56E-04	6.44E-04	2	0.2861	15	3.53E-04
107	120	20	45	30	3	8.51E+00	6.11E-04	1.57E-04	1.57E-04	6.50E-04	2	0.2861	15	3.56E-04
108	120	20	45	30	3	8.59E+00	6.17E-04	1.59E-04	1.59E-04	6.56E-04	2	0.2861	15	3.59E-04
109	120	20	45	30	3	8.67E+00	6.22E-04	1.60E-04	1.60E-04	6.62E-04	2	0.2861	15	3.63E-04
110	120	20	45	30	3	8.75E+00	6.28E-04	1.62E-04	1.62E-04	6.68E-04	1	0.3834	30	5.46E-04
111	120	20	45	30	3	8.83E+00	6.34E-04	1.63E-04	1.63E-04	6.74E-04	2	0.2861	15	3.69E-04
112	120	20	45	30	3	8.91E+00	6.39E-04	1.65E-04	1.65E-04	6.80E-04	2	0.2861	15	3.72E-04
113	120	20	45	30	3	8.99E+00	6.45E-04	1.66E-04	1.66E-04	6.87E-04	2	0.2861	15	3.76E-04

Tableau 2 : Caractéristiques des roues coniques

**ROUES VIS SANS
FIN**

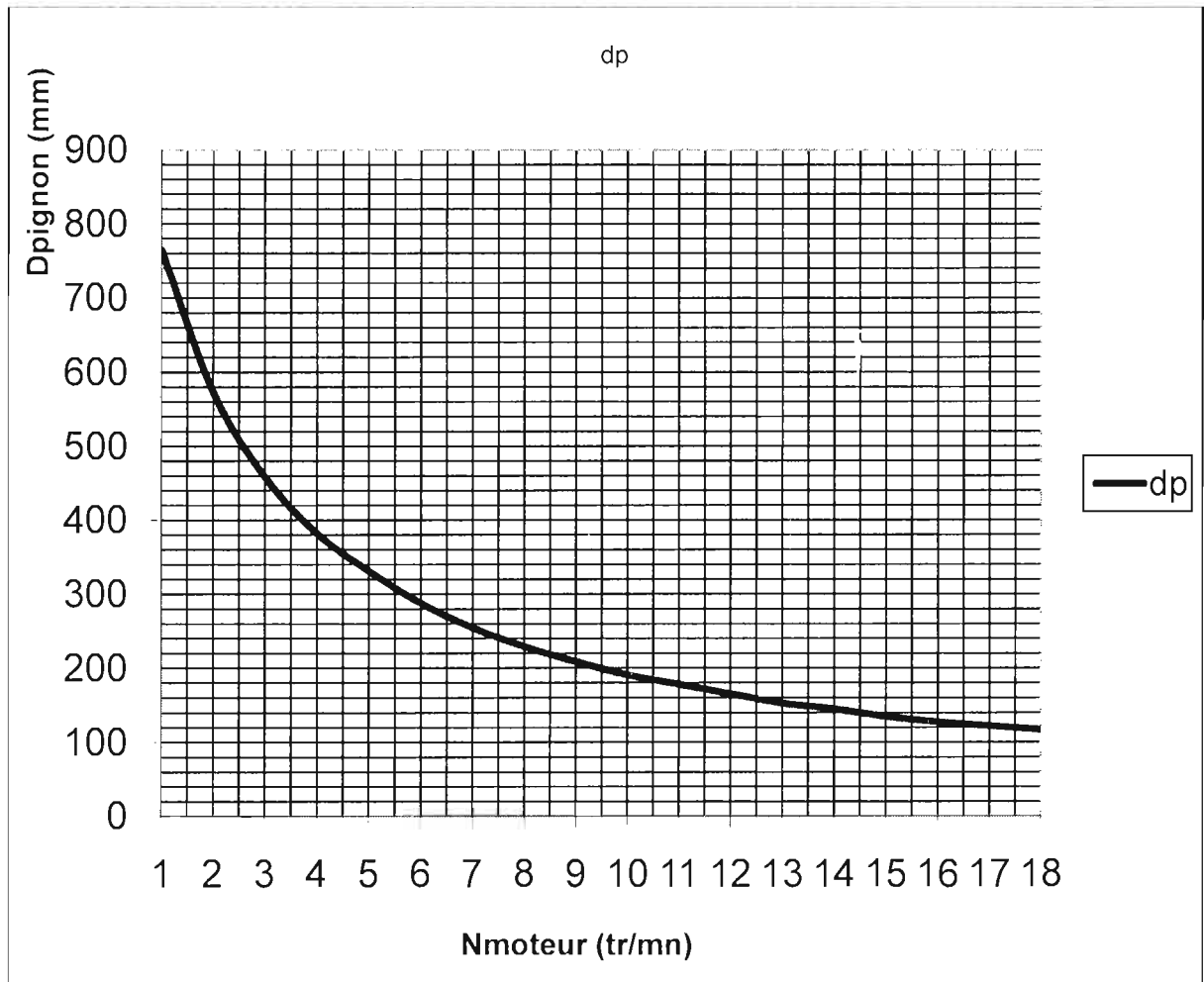
Données		Dimensions			Forces					Roue							
P (W)	Nv (tr/mn)	α_n	β	dv	Cv	$F_{Tx} = F_{Ar}$	$F_{Ty} = F_{Av}$	F_R	F	ZR	CR	mn	b	Y	Z	Ze	σ_{max} (N/mm ²)
98	120	20	84	30	7.80	5.20E-04	5.46E-05	1.90E-04	5.56E-04	40	311.94	1.5	3	0.44	40	40.66	2.78E-05
99	150	20	84	30	6.30	4.20E-04	4.42E-05	1.54E-04	4.50E-04	40	252.10	1.5	3	0.44	41	41.68	2.22E-05
100	150	20	84	30	6.37	4.24E-04	4.46E-05	1.55E-04	4.54E-04	40	254.65	1.5	3	0.45	42	42.70	2.22E-05
101	150	20	84	30	6.43	4.29E-04	4.51E-05	1.57E-04	4.59E-04	40	257.19	1.5	3	0.45	43	43.71	2.22E-05
102	150	20	84	30	6.49	4.33E-04	4.55E-05	1.58E-04	4.63E-04	40	259.74	1.5	3	0.45	44	44.73	2.22E-05
103	150	20	84	30	6.56	4.37E-04	4.59E-05	1.60E-04	4.68E-04	40	262.29	1.5	3	0.46	45	45.75	2.22E-05
104	150	20	84	30	6.62	4.41E-04	4.64E-05	1.62E-04	4.72E-04	40	264.83	1.5	3	0.46	46	46.76	2.22E-05
105	150	20	84	30	6.68	4.46E-04	4.68E-05	1.63E-04	4.77E-04	40	267.38	1.5	3	0.47	47	47.78	2.23E-05
106	150	20	84	30	6.75	4.50E-04	4.73E-05	1.65E-04	4.81E-04	40	269.93	1.5	3	0.47	48	48.80	2.23E-05
107	150	20	84	30	6.81	4.54E-04	4.77E-05	1.66E-04	4.86E-04	40	272.47	1.5	3	0.48	49	49.81	2.23E-05
108	150	20	84	30	6.88	4.58E-04	4.82E-05	1.68E-04	4.90E-04	40	275.02	1.5	3	0.48	50	50.83	2.23E-05
109	150	20	84	30	6.94	4.63E-04	4.86E-05	1.69E-04	4.95E-04	40	277.57	1.5	3	0.48	51	51.85	2.23E-05
110	150	20	84	30	7.00	4.67E-04	4.91E-05	1.71E-04	5.00E-04	40	280.11	1.5	3	0.49	52	52.86	2.24E-05
111	150	20	84	30	7.07	4.71E-04	4.95E-05	1.72E-04	5.04E-04	40	282.66	1.5	3	0.49	53	53.88	2.24E-05
112	150	20	84	30	7.13	4.75E-04	5.00E-05	1.74E-04	5.09E-04	40	285.21	1.5	3	0.50	54	54.90	2.24E-05

Tableau 3 : Caractéristiques du système

N _{moteur}	V (mm/s)	Pignon (chaîne)				Roue					Vis					Tambour		a _{1mm}	d _{arb}	
		N ₂	d _p	Z _p	P _p	d _r	Z _R	m _n	P _{IR}	β _R	d _v	Z _v	P _z	β _v	L	a	d _T			V _M
380	30	9.4	61.12	24	8	40.76	41	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	25.16	80	38.53	37.31	10
20	30	0.5	1145.92	450	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	1.61	43.36	10
30	30	0.8	763.94	300	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	2.78	43.36	10
40	30	1	572.96	225	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	3.96	43.36	10
50	30	1.3	458.37	180	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	5.14	43.36	10
60	30	1.5	381.97	150	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	6.32	43.36	10
70	30	1.7	331.04	130	8	40.67	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	25.12	90	7.41	43.23	10
80	30	2	287.75	113	8	40.40	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.98	90	8.64	43.31	10
90	30	2.3	254.65	100	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	9.85	43.36	10
100	30	2.5	229.18	90	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	11.03	43.36	10
110	30	2.7	208.81	82	8	40.31	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.94	90	12.18	43.34	10
120	30	3	190.99	75	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	13.39	43.36	10
130	30	3.2	178.25	70	8	40.67	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	25.12	90	14.41	43.23	10
140	30	3.5	165.52	65	8	40.67	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	25.12	90	16.57	43.23	10
150	30	3.8	152.79	60	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	18.92	43.36	10
160	30	3.9	145.15	57	8	40.76	41	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	25.16	90	17.86	43.21	10
170	30	4.2	134.96	53	8	40.27	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.92	90	19.26	43.35	10
180	30	4.5	127.32	50	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	90	20.46	43.36	10
190	30	4.7	122.23	48	8	40.76	41	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	25.16	90	21.35	43.21	10
200	30	5	114.59	45	8	40.22	40	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	24.89	100	25.43	49.04	10
210	30	5.1	112.05	44	8	41.29	41	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	25.43	90	23.37	43.05	10
220	30	5.4	106.95	42	8	41.29	41	1	3.159	6	9.57	1	3.16	84	15.79	25.43	90	24.51	43.05	10

ANNEXE B : Les courbes

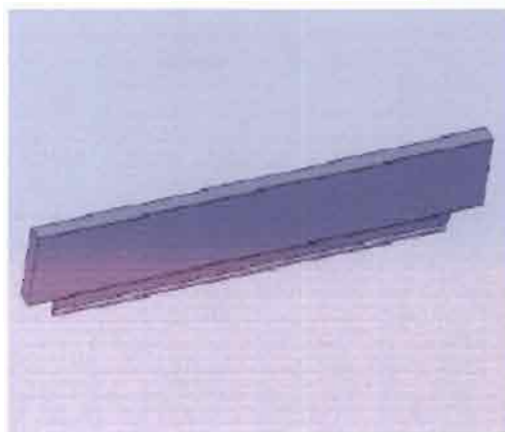
Courbe 1 : Diamètre du pignon en fonction de la vitesse de rotation du moteur



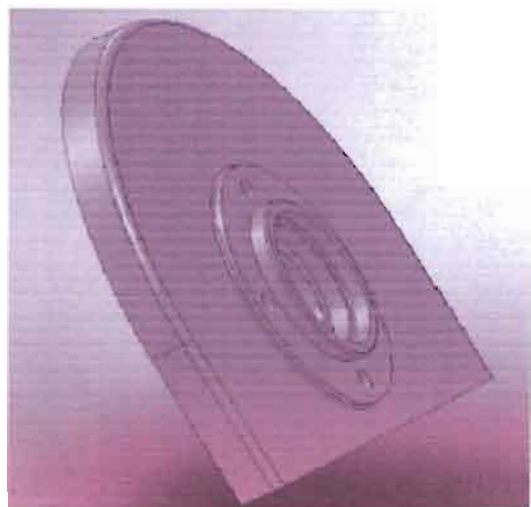
ANNEXE C : Les figures



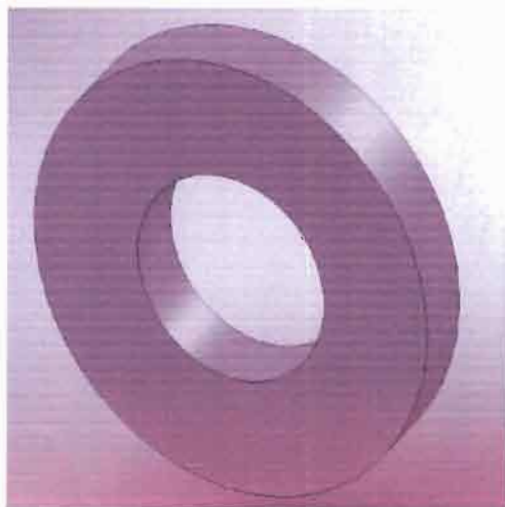
Glissière gauche



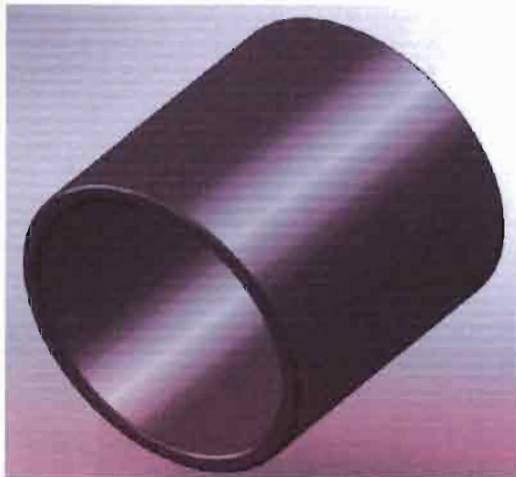
Raclette



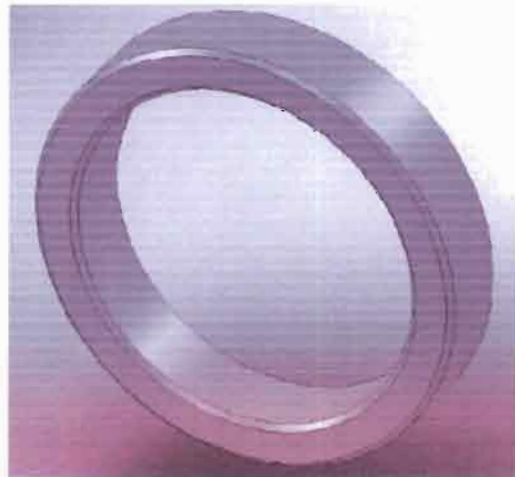
Flasque A



Flasque 1



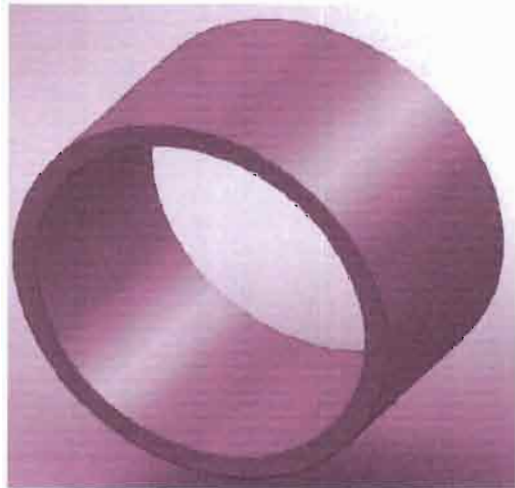
Entretoise 4



Entretoise 3



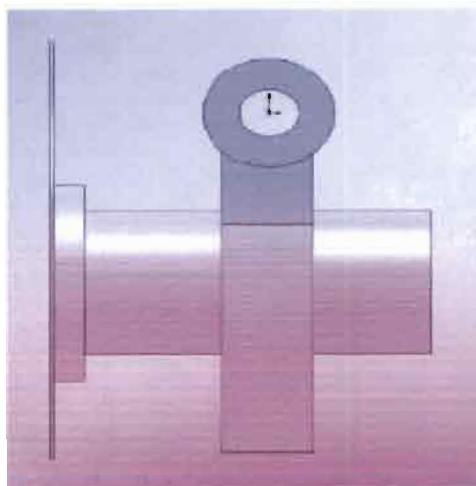
Entretoise 1



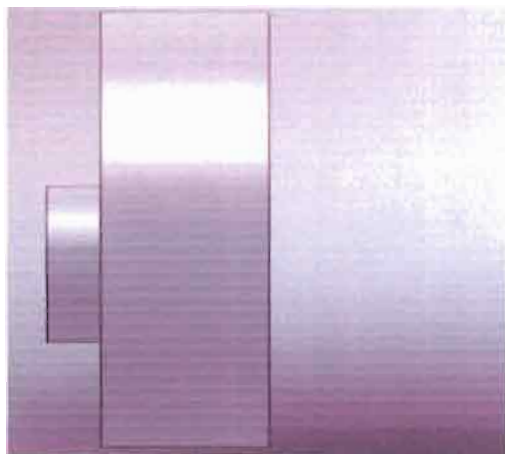
Entretoise 2



Couvercle



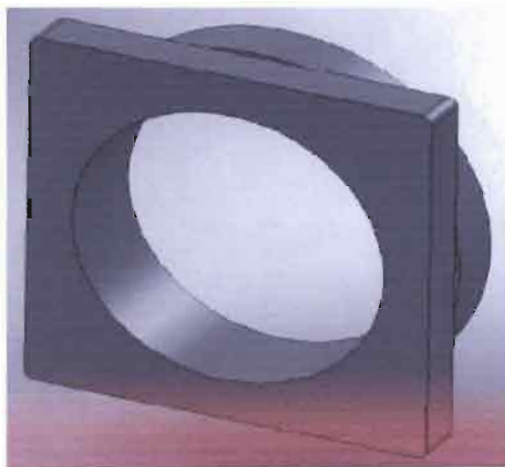
Corps 2



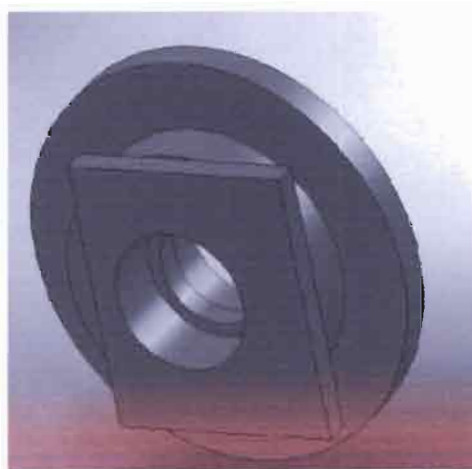
Corps 1



Sous-ensemble 3



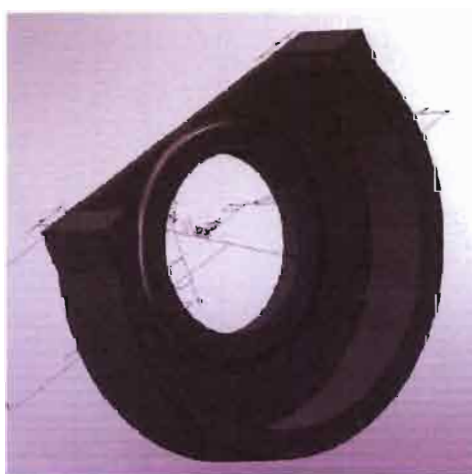
Carter P12



Carter P9



Carter P8



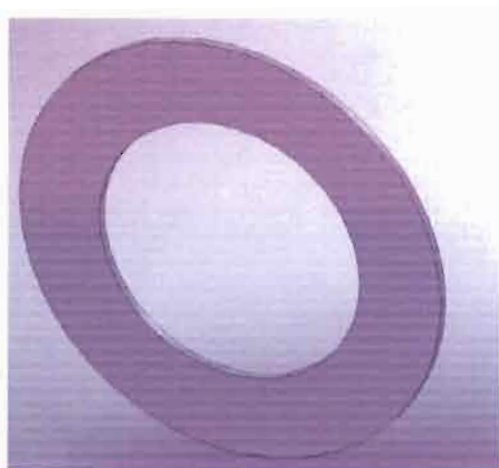
Carter P5



Carter P4



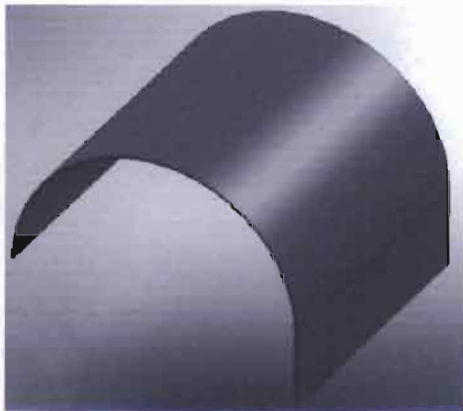
Carter P1



Cale



Axe tambour



Cache tambour



Axe rouleau



Ail droit



Ail gauche