

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par :

Houidi Abderrahim

Bekkouche yacer

Thème:

**Étude et simulation d'une génératrice pour la
production d'électricité dans une centrale
solaire à Tour**

Soutenu publiquement

Le :09/07/2019

Devant le jury :

M^f Bouakaz Ouahid

MAA

Président

UKM Ouargla

M^{me} Benbouza Naima

MCB

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^{me} Belkebir Amel

MAA

Co-Encadreur

UKM Ouargla

M^f Kadri Ahmed Yacine

MCB

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2018/2019

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents , qui m'éclairaient comme une lampe dans l'obscurité, m'ont aidé à payer pour ce succès et leur souhaitent santé et bien-être.

*A mes chers frères et sœurs, en particulier à mon petit frère **Diyae Eddine**.*

*Et à chaque famille **Bekkouche**.*

Et à tous mes chers amis.

*Et à ceux qui nous ont aidés dans ce travail de professeurs et d'administrateur, en particulier professeur **Djamel Taibi***

*Et au laboratoire des énergies renouvelable à Ghardaïa et en particulier Monsieur **A. Gama**.*

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents , qui m'éclairaient comme une lampe dans l'obscurité, m'ont aidé à payer pour ce succès et leur souhaitent santé et bien-être.

A mes chers frères et sœurs, en particulier à mon petit frère.

*Et à chaque famille **Houidi** .*

Et à tous mes chers amis.

*Et à ceux qui nous ont aidés dans ce travail de professeurs et d'administrateur, en particulier professeur **Djamel Taibi***

*Et au laboratoire des énergies renouvelable à Ghardaïa et en particulier Monsieur **A. Gama**.*

Remerciement

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser ce mémoire.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à l'encadreur **Mme Benbouza Naima** et co-encadreur **Mme Belkebir Amel** enseignantes à l'université **Kasdi Merber Ouargla**, qui nous ont dirigés le long de ce travail.*

*Nous remercions très sincèrement **Mr Gama Amor** et **Mme Yettou fatiha** Maitres de conférence au centre de recherche **Ghardaia** de nous avoir accueillis au centre de recherche Ghardaia et de nous avoir fourni les données et les informations nécessaires pour accomplir ce travail.*

*Nos remerciements les plus profonds vont également à notre enseignant **Mr Taibi Djamel** de l'université **Kasdi Merber Ouargla** qui nous a apporté tout l'aide pour accomplir ce travail*

*Nous remercions très chaleureusement **Mr Bouakaz Ouahid** enseignant à l'université de **Kasdi Merbeh Ouargla** pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Nos remerciements sincères vont à **Mr A.Y. Kadri** enseignant à l'université **Kasdi Merbeh Ouargla** de nous avoir honorés par sa présence au jury autant qu'examineur.*

Nous tenons à remercier tous les amis (es) qui nous ont aidés de loin ou de près dans la réalisation de ce travail.

RESUME		
LISTE DES FIGURES		
LISTE DES TABLEAUX		
NOMENCLATURE		
INTRODUCTION GENERALE		01
CHAPITRE I :GENERALITES SUR LES CENTRALES SOLAIRES		
I.1.	Introduction	02
I.2.	L'énergie solaire	02
I.2.2.	Le potentiel solaire mondiale et en Algérie	03
I.3.	Les centrales solaires	04
I.3.1.	Présentation générale	04
I.3.2.	Les centrales photovoltaïques	05
I.3.2.1.	L'effet photovoltaïque	05
I.3.2.2.	Les cellules photovoltaïques ou photopiles	05
I.3.2.3.	Le système photovoltaïque	07
I.4.	Les centrales solaires thermodynamiques	08
I.4.1.	Les différents types de centrales solaires thermodynamiques	09
I.4.1.1.	Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques	09
I.4.1.2.	Les centrales solaires à miroir de Fresnel	09
I.4.1.3.	Les centrales du tour solaire	10
I.4.1.4.	Les centrales à capteur paraboliques	11
I.4.2.	Le principe et le fonctionnement du tour solaire	12
I.4.3.	Les types de récepteurs d'une centrale solaire à tour	13
I.4.3.1.	Le récepteur à eau-vapeur	13
I.4.3.2.	Le récepteur à sel fondu	14
I.4.3.3.	Le récepteur à métal fondu	14
I.4.3.4.	Le récepteur à air	15
I.5.	Les centrales hybrides	15
I.5.1.	Principe de fonctionnement d'une centrale solaire hybride (solaire/fossile)	16
I.5.2.	Stockage de l'énergie thermodynamique	17
I.5.2.1.	Système à un seul réservoir	17
I.5.2.2.	Système à deux réservoirs	18
I.5.2.3.	Les sels fondus	19
I.6.	Conclusion	19

CHAPITRE II : SIMULATION DE LA GENERATRICE SYNCHRONNE A ROTOR BOBINE		
II.1.	Introduction	20
II.2.	Types de génératrices électriques	20
II.2.1.	Génératrice à courant continu	20
II.2.1.1.	composition d'une génératrice à courant continu	20
II.2.2.	Génératrice à courant alternatif	21
II.2.2.1.	Génératrice synchrone (alternateur)	21
II.2.2.1.1.	Construction d'un générateur synchrone	21
II.2.2.1.2.	Principe de fonctionnement	23
II.2.2.1.3.	Schéma équivalent des alternateur	23
II.2.2.1.4.	Domaine d'utilisation des alternateurs	24
II.2.3.	Génératrice asynchrone	24
II.2.3.1.	Constitution de la machine asynchrone	24
II.2.4.	Entrainement des génératrices électrique	25
II.2.4.1.	Turbine à vapeur et turbine à gaz	25
II.2.5.	Bilan de puissance	26
II.3.	Modélisation de la génératrice synchrone à rotor bobine	26
II.3.1.	Structure générale d'une machine synchrone à rotor bobiné	26
II.3.2.	Hypothèses simplificatrices	27
II.3.3.	Mise en équation de la machine	27
II.3.3.1.	Equations électriques	27
II.3.3.2.	Equation magnétique	28
II.3.4.	Passage dans le repère de Park	29
II.3.5.	Choix du référentiel	30
II.3.6.	Modèle de la machine synchrone à rotor bobine dans le repère de Park	31
II.3.6.1.	Equations électriques	31
II.3.6.2.	Equations magnétiques	31
II.3.6.3.	Expression du couple électromagnétique	31
II.3.6.4.	Equations mécanique	32
II.4.	Simulation par Matlab	32
II.4.1.	Charge résistive (R)	33
II.4.2.	Charge inductive (RL)	37
II.5.	Conclusion	40
	CONCLUSION GENERALE	
	BIBLIOGRAPHIE	

Résumé

La production de l'électricité peut être faite de deux façons: soit via les énergies traditionnelles, non durables et non renouvelables ou via les énergies renouvelables durables dépendant de la nature. Parmi les énergies renouvelables les plus importantes l'énergie solaire, ayant comme source le soleil. La production de l'énergie électrique à partir du solaire se fait par différentes technologies comme le photovoltaïque qui utilise les panneaux solaires et le thermodynamique qui utilise les tours solaires, qui se composent de miroirs pour la conversion de l'énergie solaire en chaleur, afin de générer de la vapeur qui sert à faire fonctionner des turbines entraînant à leur tour des alternateurs produisant ainsi de l'électricité. Ces alternateurs sont généralement des génératrices synchrones produisant du courant alternatif. Ce travail consiste en la simulation par le logiciel MATLAB /SIMULINK d'une génératrice synchrone à rotor bobiné dans un tour solaire à fin de voir son comportement en lui appliquant différentes charges.

Mots clés :énergie solaire, tour solaire, génératrice synchrone .

Abstract

The production of electricity can be done in two ways: either through traditional, non-sustainable and non-renewable energies or via sustainable renewable energies depending on the nature. Among the most important renewable energies solar energy, having as source the sun. The production of electrical energy from solar is done by different technologies such as photovoltaics using solar panels and thermodynamics using solar towers, which consist of mirrors for the conversion of solar energy into heat, in order to generate steam which is used to operate turbines, in turn drives alternators to produce electricity. These alternators are generally synchronous generators producing alternating current. This work consists in the simulation by the MATLAB / SIMULINK software of a synchronous generator with wound rotor in a solar tower in order to see its behavior by applying to it different loads.

Key words: solar energy, solar tower, synchronous generatrice.

المخلص:

يتم إنتاج الكهرباء بطريقتين: إما من خلال الطاقات التقليدية وغير المستدامة وغير المتجددة أو عن طريق الطاقات المتجددة المستدامة اعتمادًا على الطبيعة. من بين أهم الطاقات المتجددة الطاقة الشمسية التي مصدرها الشمس. يتم إنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية بواسطة تقنيات مختلفة مثل الألواح الضوئية باستخدام الألواح الشمسية والديناميكا الحرارية باستخدام أبراج الشمسية ، والتي تتكون من مرايا لتحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة ، لتوليد البخار الذي يستخدم لتشغيل التربينات ، التي تقوم بتدوير مولدات لإنتاج الكهرباء. هذه المولدات عادة ما تكون مولدات متزامنة تنتج تيارًا متناوبًا. هذا العمل يتمثل في إجراء محاكاة في برنامج MATLAB / SIMULINK لمولد متزامن في برج شمسي من أجل تبيان عمله من خلال تطبيقه على كميات مختلفة من الحمولات الكهربائية .

الكلمات الرئيسية: الطاقة الشمسية ، برج الطاقة الشمسية ، مولد كهربائي متزامن.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Généralités sur Les Centrales Solaires

<i>Figure I.2</i> : Potentiel solaire mondiale.....	3
<i>Figure I.3</i> : Potentiel de l'Algérie.....	4
<i>Figure I.4</i> : Collision entre un photon et un atome.....	5
<i>Figure I.5</i> : Constitution d'un générateur PV à partir de cellules photovoltaïques.....	6
<i>Figure I.6</i> : La Jonction NP connectée à une charge.....	7
<i>Figure I.7</i> : Schéma bloc d'une installation photovoltaïque avec stockage d'énergie.....	8
<i>Figure I.8</i> : Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie.....	8
<i>Figure I.13</i> : Schéma de centrale solaire thermodynamique.....	9
<i>Figure I.14</i> : Schéma de principe d'un concentrateur cylindro-parabolique.....	10
<i>Figure I.15</i> : Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel.....	10
<i>Figure I.16</i> : Schéma de principe d'une centrale à tour.....	10
<i>Figure I.18</i> : Schéma de principe d'un centrale à capteur parabolique.....	11
<i>Figure I.19</i> : Schéma de principe à tour solaire.....	12
<i>Figure I.20</i> : Centrale solaire à tour dans Californie.....	13
<i>Figure I.21</i> : Un système à eau-vapeur.....	13
<i>Figure I.22</i> : Un système à sel fondu.....	14
<i>Figure I.23</i> : Configuration hybride solaire/fossile (cycle combiné).....	16
<i>Figure I.24</i> : Système à un seul réservoir.....	18
<i>Figure I.25</i> : Système à deux réservoirs.....	19

CHAPITRE II : simulation de la génératrice synchrone à rotor bobine

<i>Figure II.1</i> : principe de fonctionnement d'une génératrice à courant continu.....	20
<i>Figure II.2</i> : Constitution de la machine à courant continu.....	21
<i>Figure II.3</i> : rotor de type à aimant permanente.....	22
<i>Figure II.4</i> : rotor à pôles saillants.....	23
<i>Figure II.5</i> : rotor à pôles lisses.....	23

LISTE DES FIGURES

<i>Figure II. 6:</i> schéma équivalent des alternateurs	23
<i>Figure II. 7:</i> stator de machine asynchrone	24
<i>FigureII. 8:</i> turbine à vapeur	25
<i>Figure II. 9:</i> turbine à gaz.....	25
<i>Figure II .10 :</i> Bilan de puissance de la production électrique	26
<i>Figure II.11 :</i> Schéma représentatif de générateur synchrone à modéliser.....	27
<i>Figure II.12:</i> Transformation triphasé – diphasé.....	29
<i>Figure II .13 :</i> Schéma simulation de génératrice synchrone a rotor bobine.....	32
<i>Figure II .14:</i> La vitesse de génératrice V (rad/s)	34
<i>Figure II .15 :</i> La puissance mécanique P_m (W) à l'entrée de la génératrice.....	34
<i>Figure II .16 :</i> les tensions V_{abc}	35
<i>Figure II .17 :</i> Les courants de la génératrice I_{abc}	35
<i>Figure II .18 :</i> La puissance active P_a (KW)	36
<i>Figure II .19 :</i> La puissance réactive Q_r (KVA)	36
<i>Figure II .20 :</i> les tensions V_{abc}	37
<i>Figure II .21 :</i> Les courants de la génératrice I_{abc}	38
<i>Figure II .22 :</i> La puissance active P_a (KW)	38
<i>Figure II .23 :</i> La puissance réactive Q_r (KVA)	39
<i>Figure II .24:</i> La vitesse de génératrice V (rad/s)	39

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Généralités sur Les Centrales Solaires

Tableau (I ,1) : Caractéristiques actuelles des dispositifs à concentration.....11

Tableau (I ,2) : Caractéristiques des fluides caloporteurs pour trois types de récepteur.....15

CHAPITRE II :Simulation De La Génératrice Synchrone A Rotor Bobine

Tableaux(II ,3): Parametre de la génératrice synchrone à rotor bobine.....33

NOMENCLATURE

$[V_a|V_b|V_c]^t$: Vecteur tension des phases statoriques.

$[I_a|I_b|I_c]^t$: Vecteur courants des phases statoriques.

$[\Phi_a|\Phi_b|\Phi_c]^t$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : Résistance des phases statoriques.

V_f : Tension d'excitation rotorique.

I_f : Courant d'excitation rotorique

ϕ_f : Flux rotorique.

R_f : Résistance rotorique

θ_0 : L'angle électrique initial

ω : Pulsation des grandeurs électrique

M : Mutuelle inductance entre phases du stator.

L : Inductance propre d'une phase statorique.

M_f : Mutuelle inductance du rotor.

I_f : Courant d'excitation rotorique.

θ : Angle entre l'axe magnétique (a) et l'axe longitudinal (d)

ω : Vitesse de rotation du référentiel choisi.

V_d, V_q : Composantes de la tension au stator dans le repère de Park.

V_f : Composantes de la tension rotorique dans le repère de Park.

I_d, I_q : Composantes du courant statorique dans le repère de Park

I_f : Composantes du courant rotorique dans le repère de Park

ϕ_d, ϕ_q : Composantes du flux statorique dans le repère de Park

ϕ_f : Flux d'excitation.

ω_r : Pulsation électrique rotorique.

L_d, L_q : Inductances de l'enroulement de stator d'axe (d) et d'enroulement de stator d'axe de q

L_f : Inductance du bobinage du champ principal.

M_{sf} : Inductance mutuelle entre l'enroulement de champ et l'enroulement du stator d'axe (d)

Ω : vitesse mécanique.

p : le nombre de paires de pôles

C_m : Couple moteur avec (couple mécanique d'une turbine).



**INTRODUCTION
GENERALES**

INTRODUCTION GENERALES

Les énergies renouvelables à notre époque sont devenues une préoccupation à majeure par opposition aux énergies des hydrocarbures, car elles sont liées à la nature et sont comparées à des hydrocarbures, qui dépendent des stocks en quantités limitées. L'une des plus importantes des énergies renouvelables est l'énergie solaire, qui est exploitée pour la production d'électricité.

L'énergie solaire est convertie en énergie électrique en utilisant diverses technologies, en utilisant les systèmes photovoltaïques ou bien la technique des tours solaires. ces centrales à tours solaires utilisent des miroirs pour la conversion de l'énergie solaire en chaleur afin de générer de la vapeur qui sert à faire fonctionner des turbines entraînant à leur tour des alternateurs produisant ainsi de l'électricité. Ces alternateurs sont des génératrices synchrones produisant du courant alternatif.

Ce travail est réparti en deux parties :

Dans la première partie, nous aborderons des généralités sur l'énergie solaire et les différents types de centrales solaires électriques et leurs principes de fonctionnement plus particulièrement les centrales à tour solaire.

Dans la deuxième partie, nous présenterons les différents types de génératrices électriques, leurs fonctionnements ainsi que leurs avantages et rendement. On effectuera une étude particulière pour la génératrice synchrone à rotor bobiné qui est souvent utilisée dans les centrales à tour solaire. L'étude est faite à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK qui nous permet de simuler la génératrice et de voir son comportement pour différentes charges.

Nous terminerons ce travail avec une conclusion générale sur les résultats obtenus.



CHAPITRE I : GENERALITES
SUR LES CENTRALES SOLAIRES

I.1. Introduction

L'énergie solaire est l'énergie produite par le soleil. Le soleil est l'étoile qui fournit à la Terre de la lumière et de la chaleur. L'énergie solaire est totalement renouvelable puisqu'elle est fournie par le soleil. C'est l'énergie que l'on retrouve en plus grande quantité sur la Terre, il suffirait d'une heure de la totalité de l'énergie captée par la terre pour alimenter la consommation mondiale annuelle des sociétés humaines [1].

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

Il existe deux types d'énergie solaire : une énergie solaire thermique qui sert à produire de la chaleur et l'énergie photovoltaïque. L'énergie photovoltaïque permet de transformer la lumière du soleil en électricité, utilisable pour alimenter des appareils électriques, chauffer une maison etc. Les panneaux photovoltaïques permettent de transformer cette énergie en électricité

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter un état de l'art sur les centrales solaires et leurs divers types (thermodynamiques, photovoltaïques et hybrides), après on abordera le principe de fonctionnement des tours solaires et on parlera des type de récepteurs des centrales solaires à tours et on traitera à la fin le stockage de l'énergie thermodynamique.

I.2. L'énergie solaire

L'énergie solaire présente plusieurs avantages non négligeables sur les autres sources énergétiques. Elle est locale, gratuite, propre, silencieuse et durable. L'énergie solaire peut être utilisée sur toute la surface de la terre ou presque, il suffit donc de capter celle-ci et de l'utiliser [2].

I.2.1. Le potentiel solaire mondiale et en Algérie

Les sources d'énergie renouvelables dans les pays au bord de la méditerranée à elles seules peuvent faire face à la demande énergétique mondiale croissante. En effet, la ressource d'énergie la plus importante dans ces pays est l'irradiation solaire, avec un potentiel qui peut satisfaire la demande en l'électricité du monde entier. Les technologies solaires utilisant les systèmes à concentration pour la production électrique exigent l'ensoleillement normal direct, qui représente entre 50 % et 90 % de la totalité du rayonnement solaire. Plus abondante dans une zone géographique appelée communément la ceinture solaire indiquée sur la figure I.2, la ressource en rayonnement solaire direct est considérable à l'échelle planétaire [3].

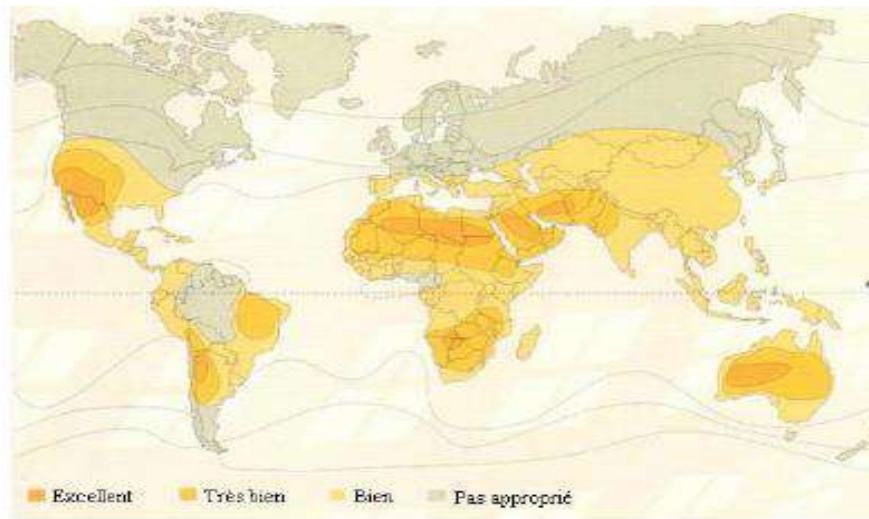


Figure I.1 : Potentiel solaire mondiale.

Avec 2381741 km² de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste du méditerranéen, selon une étude de l'agence aérospatiale allemande, l'Algérie offre de plus grandes possibilités intéressantes ; à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires. En effet l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme, selon les données d'ensoleillement (Fig I.3), l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés au monde. [3].

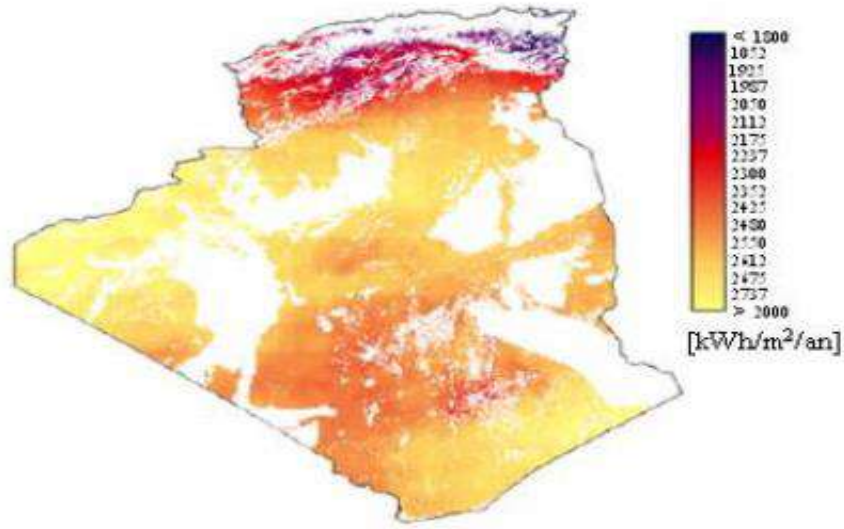


Figure I.2 : Potentiel de l'Algérie

I.3. Les centrales solaires

Il existe trois types de centrales de production d'énergie électrique d'origine solaire : les centrales solaires photovoltaïques, les centrales solaires thermodynamiques et les centrales hybrides :

I.3.1. Présentation générale

Les centrales solaires est une installation de production d'énergie à partir de la lumière solaire, et composée deux types une centrale solaire thermique (ou thermodynamique) transforme l'énergie lumineuse en chaleur, laquelle sert ensuite à produire de l'électricité. Les rayons solaires sont concentrés par des réflecteurs sur un liquide vecteur de chaleur, dirigé vers une turbine. Il existe de multiples configurations possibles, et une centrale photovoltaïque est composée de panneaux solaires comportant un grand nombre de cellules photoélectriques convertissant directement l'énergie lumineuse en électricité [2].

I.3.2. Les centrales photovoltaïques

I.3.2.1. L'effet photovoltaïque

Le solaire photovoltaïque repose sur l'effet photoélectrique, découvert en 1839 par Antoine Becquerel et théorisé en 1922 par Albert Einstein. C'est l'énergie lumineuse qui arrache un ou plusieurs électrons aux atomes de silicium du capteur. Ces électrons, en se déplaçant, fournissent un courant ou une tension électrique.

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière (Fig I.4). L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [4].

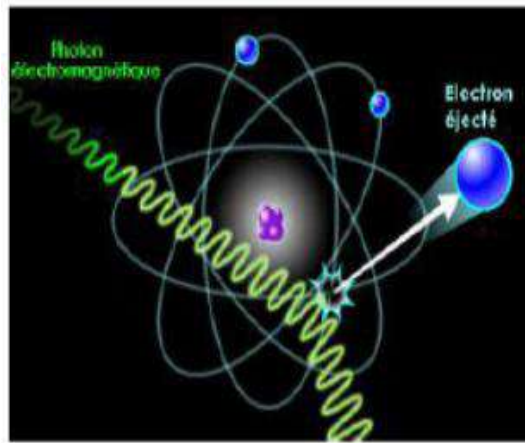


Figure I.3 : Collision entre un photon et un atome.

I.3.2.2. Les cellules photovoltaïques ou photopiles

Il est possible d'utiliser directement l'énergie reçue du soleil grâce à des capteurs soit sous forme électrique, soit thermiques.

Le générateur photovoltaïque responsable de la conversion d'énergie solaire incidente en énergie électrique par l'effet photovoltaïque, est constitué de plusieurs modules assemblés en série et en parallèle selon la puissance demandée ; chaque module est lui-même constitué de cellules photovoltaïque généralement montés en série (Fig I.5).

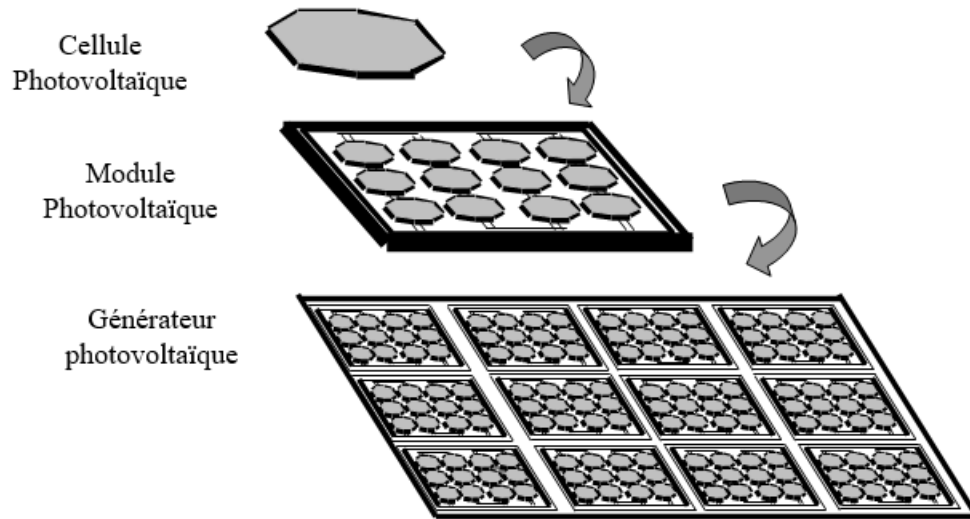


Figure I.4 : Constitution d'un générateur PV à partir de cellules photovoltaïques.

Actuellement la majorité des cellules solaires commercialisées sont fabriquées en silicium, la différence entre les constructeurs se situe dans la taille et la forme des cellules et celle des modules ainsi que dans la manière d'encapsulation des cellules.

Une cellule photovoltaïque est principalement constituée à partir de silicium dopé (semi-conducteur : jonction PN). Lorsqu'une cellule est exposée au rayonnement électromagnétique solaire, les photons de la lumière transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Cette énergie permet aux électrons de libérer des atomes, générant ainsi des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ces charges sont alors maintenues séparées par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Une fois les charges P et N isolées, il suffit de fermer le circuit entre ces deux zones P et N pour mettre en mouvement les électrons et crée ainsi un courant électrique. L'effet photovoltaïque ainsi réalisé permet de convertir l'énergie du rayonnement (photon) en énergie électrique (Volt) (Fig I.6).

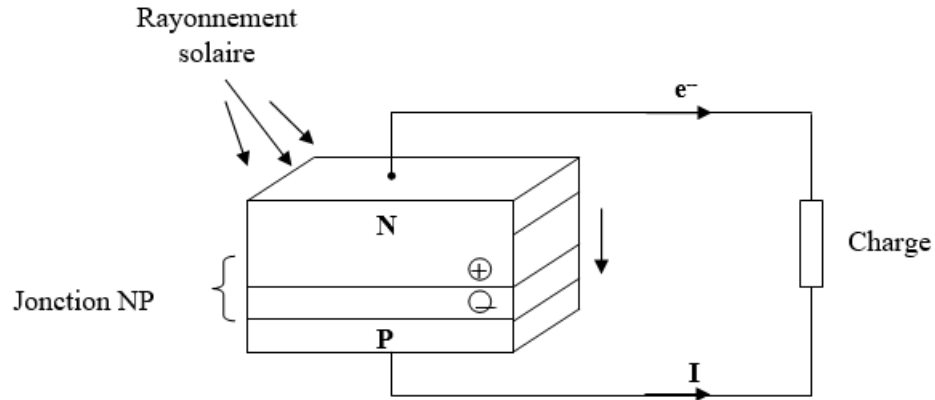


Figure I.5 : La Jonction NP connectée à une charge.

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque, les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont à base du silicium sous forme monocristallin, polycristallin ou amorphe ; ces matériaux sont utilisés en tranches fines ou en dépôts sur un substrat.

I.3.2.3. Le système photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte donc de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module ou panneau solaire [5].

En fonction de la puissance désirée, les panneaux eux-mêmes peuvent être assemblés pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement ou nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Un régulateur est alors indispensable pour protéger la batterie contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie.

Enfin, le générateur photovoltaïque produisant du courant continu (comme des piles), il est nécessaire pour un certain nombre d'applications de le convertir, à l'aide d'un onduleur en courant alternatif (comparable à celui qui alimente nos appareils type télévision, réfrigérateur, etc....).

Ces différents éléments constituant le système photovoltaïque, générateur d'énergie électrique (Fig I.7), sont décrits dans les paragraphes suivants :

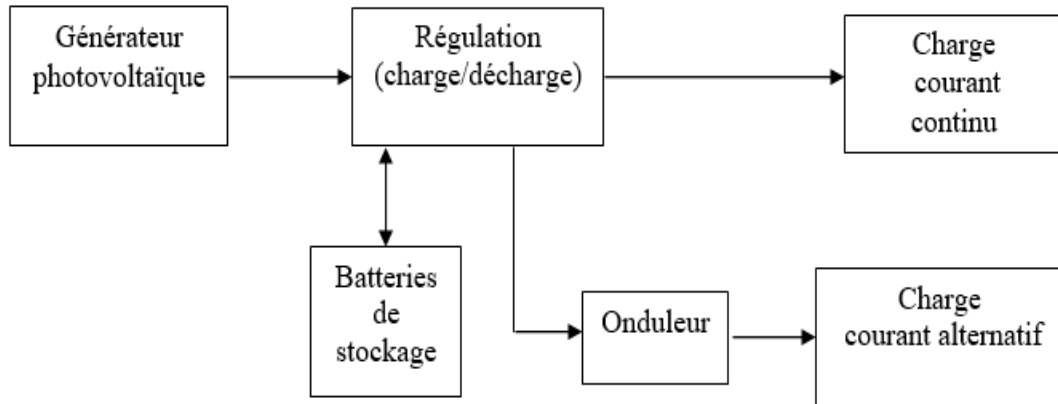


Figure I.6 : Schéma bloc d'une installation photovoltaïque avec stockage d'énergie.

I.4. Les centrales solaires thermodynamiques

L'énergie thermique provenant du rayonnement solaire collecté est convertie grâce à un fluide caloporteur puis un fluide thermodynamique. Dans certains cas, le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique. Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, oriente le choix de la technologie et des matériaux du récepteur et conditionne la possibilité et la commodité du stockage [6] (Fig I.13).

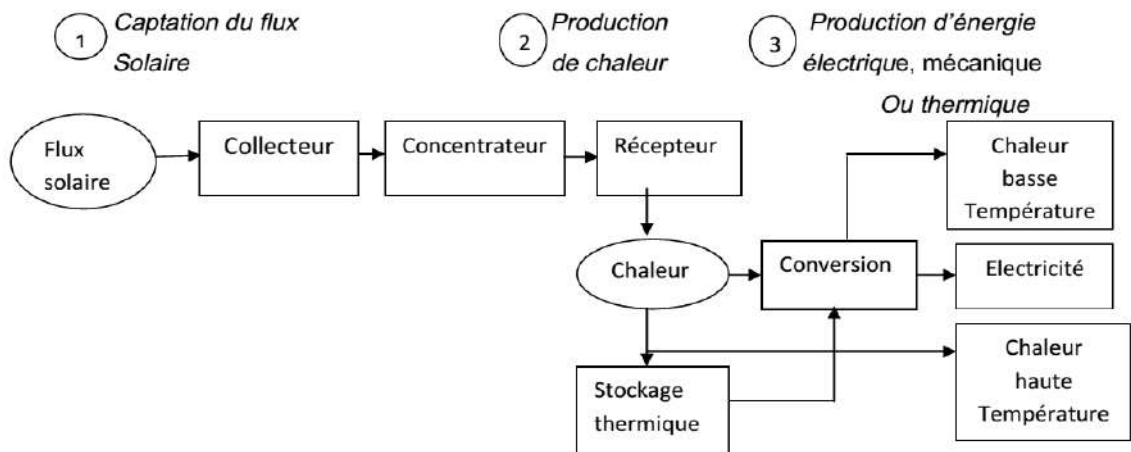


Figure I.7 : Schéma de centrale solaire thermodynamique.

I.4.1. Les différents types de centrales solaires thermodynamiques

Il existe quatre grande catégories de centrales thermodynamiques les plus connues sont les centrales paraboliques, les cylindro-paraboliques, les miroirs de Fresnel et les centrales du tour solaire :

I.4.1.1. Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques

Ce type de centrale (Fig I.14) se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal ; dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique [7].

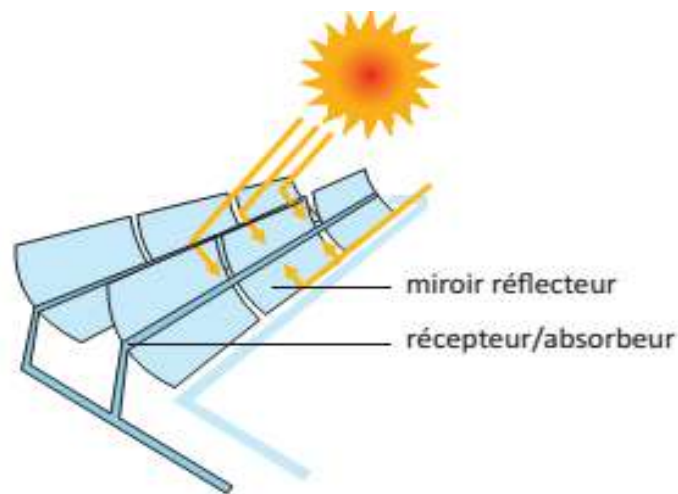


Figure I.8 : Schéma de principe d'un concentrateur cylindro-parabolique.

I.4.1.2. Les centrales solaires à miroir de Fresnel

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique. Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans. C'est le principe du concentrateur de Fresnel (Fig I.15). Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes [7].

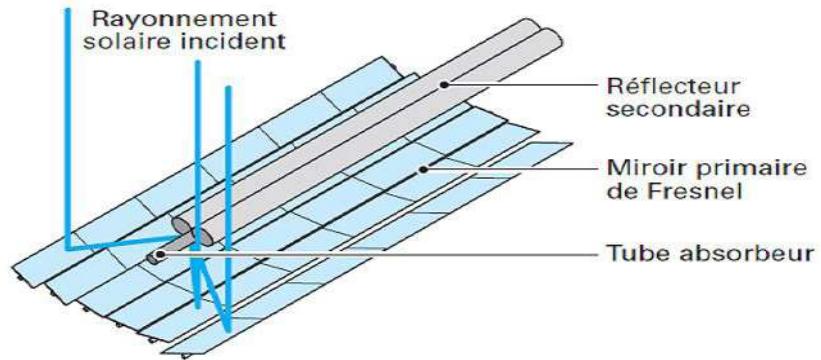


Figure I.9 : Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel.

I.4.1.3. Les centrales du tour solaire

Les centrales solaires à tour (Fig I.16) sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire.

Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °c à 1000 °C [6].

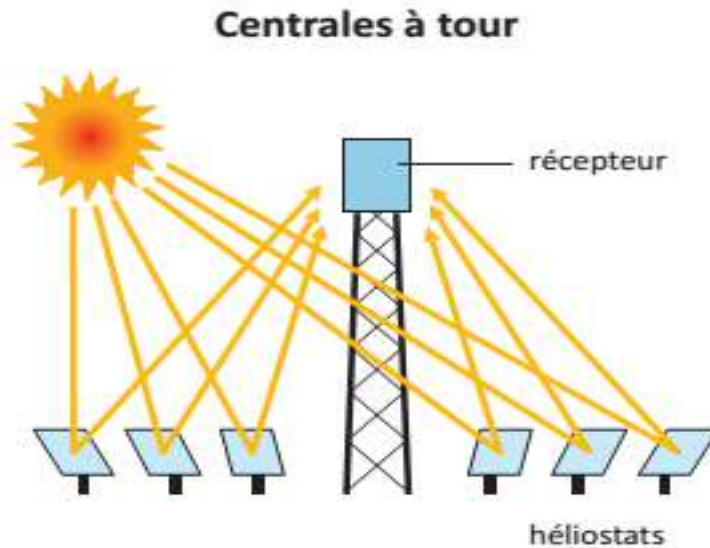


Figure I.10 : Schéma de principe d'une centrale à tour.

I.4.1.4. Les centrales à capteur paraboliques

Un système à réflecteur parabolique (Fig I.18), utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer du récepteur. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750 à 1000°C. Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un petit moteur fixé au récepteur [3]. Les caractéristiques actuelles des dispositifs à concentration sont données sur le tableau I.2 :

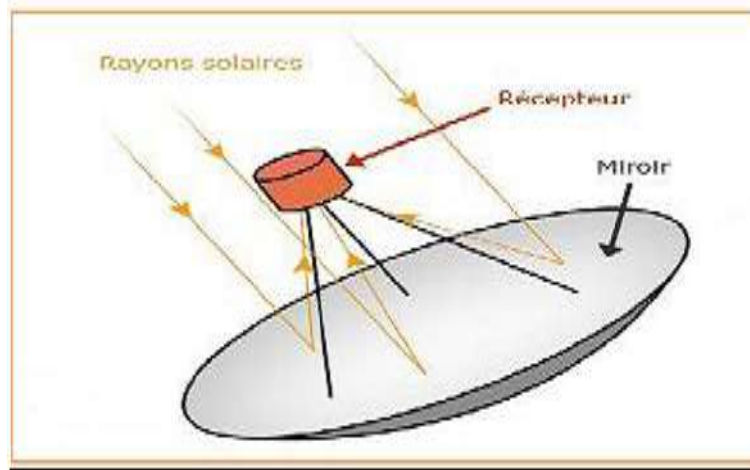


Figure I.11 : Schéma de principe d'une centrale à capteur parabolique.

Tableau I.1 : Caractéristiques actuelles des dispositifs à concentration

Technologie	Cylindro-parabolique	Tour	Parabole
Rendement thermique nominal ¹⁷	70%	73%	75%
Puissance des installations	80 - 300 MW _{th}	10 - 100 MW _{th}	1 - 100 kW _{th}
Concentration ¹⁸	60 - 400	700 - 1200	6000 - 10000
Température de travail	270 - 450 °C	450 - 1000 °C	600 - 1200 °C
Prix du champ solaire ¹⁹	210-250 €/m ² ²⁰	140-220 €/m ²	~150 €/m ²
Coût total d'investissement	2,8 - 3,5 €/W _e	3 - 4 €/W _e	10 - 14 €/W _e

I.4.2. Le principe et le fonctionnement du tour solaire

La Tour Solaire, de 500 à 1000 mètres de hauteur, est l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative. C'est une usine d'énergie renouvelable qui fournit la même puissance qu'un petit réacteur nucléaire tout en étant plus sûr et plus propre. Un projet de tour solaire, appelé Projet Buronga et prévu pour 2010, est actuellement développé en Australie par la société Enviromission.

La hauteur envisagée de la tour (990 mètres) sera presque le double de celle du plus haut gratte-ciel jamais construit. Son diamètre à la base sera de 70 mètres, entouré d'une « serre » circulaire de 6 km de diamètre [8] (Fig I.19).

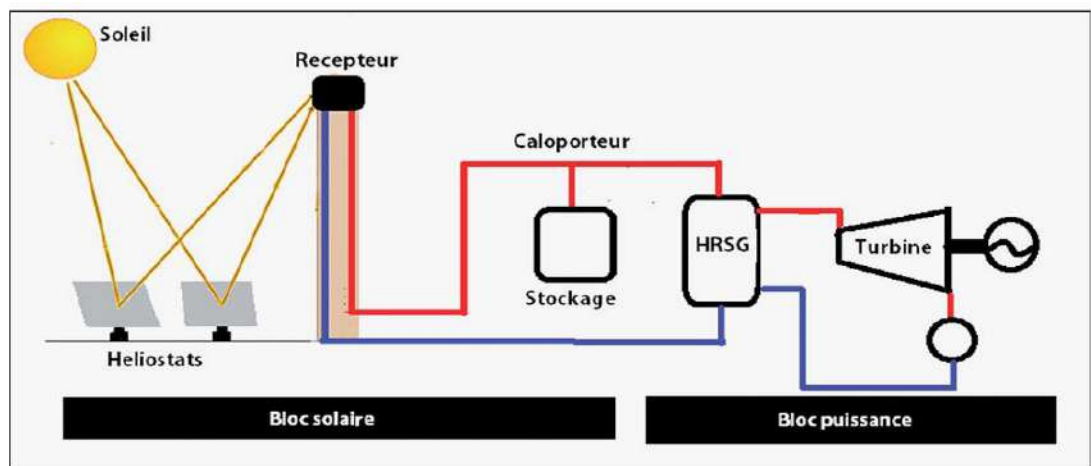


Figure I.12 : Schéma de principe à tour solaire.

Les tours solaires ou centrales à concentration (Fig I.20), reposent pratiquement sur le même principe que les centrales cylindro-paraboliques. Elles sont composées de deux blocs.

Le bloc solaire se présente sous la forme d'une tour géante autour de laquelle sont situés plusieurs centrales ou milliers de miroirs qui reflètent les rayons du soleil à un point unique au sommet de la tour. Les miroirs, aussi appelés "héliostats" (en grec : qui fixe le soleil) suivent le déplacement du soleil. Le point situé au sommet de la tour, appelé absorbeur, va permettre de transformer les rayons émis par le soleil en chaleur à haut température ; elle peut atteindre 600°C. Ainsi, le liquide placé en haut de la tour va se chauffer et va être en contact avec de l'eau.

Le bloc puissance est constitué d'une chaudière qui permet de créer de la vapeur grâce au contact du liquide et de l'eau. La vapeur produite entraîne une turbine qui produit de l'électricité. Le liquide permet donc de transférer la chaleur du bloc solaire au bloc puissance [9].



Figure I.13 : Centrale solaire à tour dans Californie.

I.4.3. Les types de récepteurs d'une centrale solaire à tour

Les principaux types de récepteurs des centrales solaires à tour sont :

I.4.3.1. Le récepteur à eau-vapeur

L'eau est convertie en vapeur dans le récepteur et est utilisée directement pour alimenter une turbine à vapeur avec le cycle de Rankine conventionnelle. Son avantage majeur est sa simplicité et sa puissance considérable (Fig I.21).

Dans ce type de récepteur, des tubes alimentés en eau à haute pression sont utilisés. L'utilisation de ces tubes présente des inconvénients : la corrosion ainsi qu'un entretien coûteux. Ces raisons font qu'aujourd'hui cette filière est pratiquement abandonnée [10].

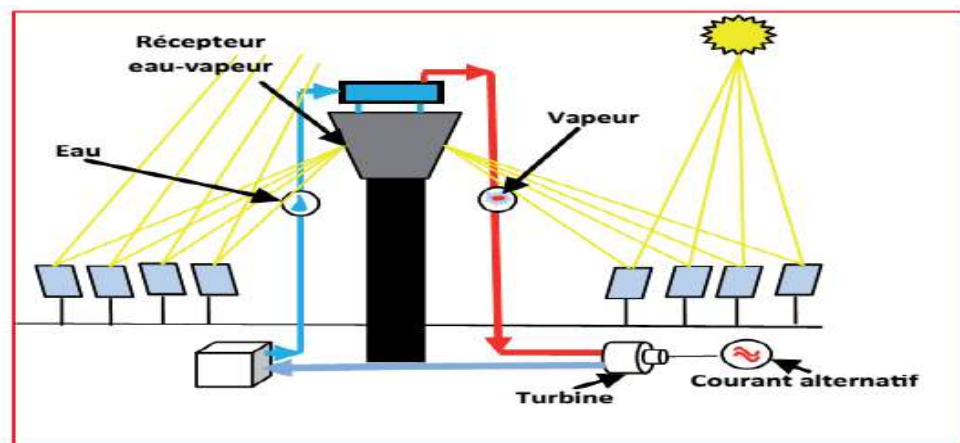


Figure I.14 : Un système à eau-vapeur.

I.4.3.2. Le récepteur à sel fondu

La technologie du sel fondu représente aujourd'hui la technologie la plus rentable pour la production d'électricité pour les centrales solaires autonomes. Le sel fondu est un fluide synthétique qui se compose de 60% de nitrate de sodium et 40% de nitrate de potassium. Les caractéristiques principales de ce fluide sont : sa grande capacité thermique volumétrique, une faible conductivité thermique. La résistance mécanique des tubes est peu sollicitée car la pression d'exploitation est peu élevée. De plus, c'est un oxydant, ininflammable et non toxique (Fig I.22).

Un tel type de récepteur présente néanmoins certains inconvénients, à savoir :

- Son circuit à grande vitesse qui favorise les échanges thermiques avec la paroi provoque en même temps une forte perte de charge.
- Leur température doit être maintenue au-dessous d'une valeur critique 600 °C.

[10].

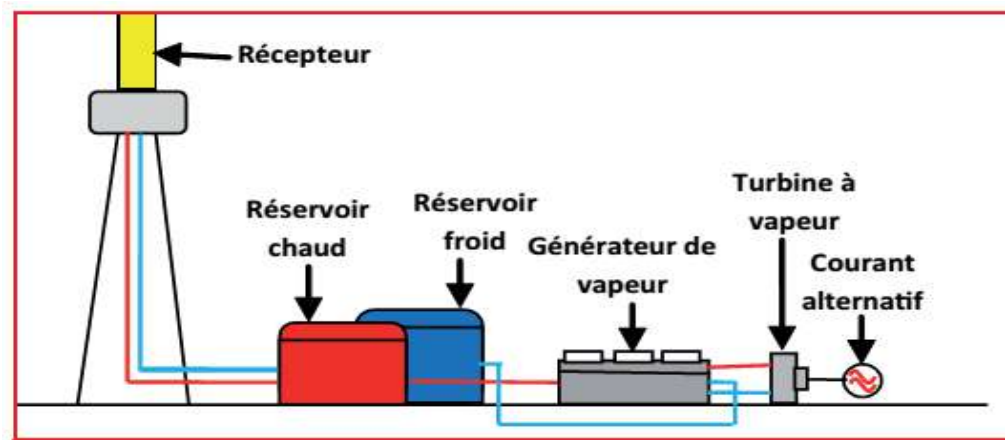


Figure I.15 : Un système à sel fondu.

I.4.3.3. Le récepteur à métal fondu

L'intérêt d'utiliser un métal fondu comme un fluide caloporteur s'interprète par sa bonne conductivité thermique, autrement dit il présente un coefficient d'échange thermique élevé avec la paroi. De ce fait, un récepteur à métal fondu (typiquement : le sodium) peut présenter une surface d'échange thermique bien moindre et une perte de charge inférieure à celle d'un récepteur à sel. L'inconvénient majeur de ce type de récepteur est qu'il soit inflammable et impose des dispositifs de sécurité importants [10].

I.4.3.4. Le récepteur à air

Dans ce cas, le récepteur se compose de plusieurs modules (Figure 3). Ces derniers contiennent un milieu poreux qui peut être en céramique ou en métal. Le rayonnement solaire concentré chauffe ce milieu. A son tour, ce dernier chauffe par convection, l'air qui passe. [10]. Les caractéristiques des fluides caloporteurs pour trois types de récepteurs sont données sur le tableau I.2 :

Tableau I.2 : Caractéristiques des fluides caloporteurs pour trois types de récepteurs.

Caractéristique	Eau à 20°C	Sel fondu 50%-50%	Air à 20°C
Densité (kg/m ³)	998.3	1800	1.205
Chaleur spécifique (kJ/kg K)	4.183	1.46	1.005
Conductivité thermique (W/m K)	0.60475	0.4215	0.0257
Viscosité cinématique (m ² /s)	1.004 x 10 ⁶	0.855 x 10 ⁶	15.11 x 10 ⁶
Nombre de Prandtl	7.01	5.285	0.713

I.5. Les centrales hybrides

Des centrales hybrides peuvent être divisées en deux catégories : ceux utilisant l'intégration thermique et ceux utilisant l'intégration thermochimique. Dans des procédés d'intégration thermiques, l'hybridation emploie l'énergie solaire pour chauffer la vapeur de l'eau, saturée ou surchauffée en combinaison avec la combustion du combustible fossile. Dans l'hybridation thermochimique, des combustibles fossiles sont employés en tant que réactifs chimiques, alors que l'énergie solaire fournit de la chaleur pour améliorer ou décarboniser le combustible fossile pour produire un carburant plus propre. L'hybridation thermique est déjà employée pour des applications industrielles, alors que l'hybridation thermochimique est toujours à l'étape expérimentale et de démonstration. Contrairement aux centrales thermiques solaires, une centrale hybride peut utiliser l'infrastructure existante d'une centrale conventionnelle, réduisant de ce fait l'investissement dans l'équipement abaissant le coût de production d'énergie.

En même temps, elle permet au problème de la nature intermittente de l'énergie solaire d'être évité. En outre, utilisant l'énergie solaire aux usines fossiles existantes va certainement alléger la pénurie des combustibles fossiles et réduire ainsi les émissions de gaz à effet de

serre particulièrement le CO₂. Ainsi, à court et moyen termes, le développement des centrales hybrides fossile/solaire est des moyens pratiques d'accélérer l'adoption de la technologie solaire de puissance thermique à plus grande échelle [11].

I.5.1. Principe de fonctionnement d'une centrale solaire hybride (solaire/fossile)

Beaucoup de centrales thermiques solaires emploient des combustibles fossiles comme source d'énergie de secours faute de lumière du soleil (Fig I.23); c'est la forme la plus commune d'hybridation. Les neuf systèmes solaires électriques commerciaux ont une capacité combinée et sont les plus réussis des cycles de Rankine. Ces systèmes emploient les capteurs solaires et le pétrole synthétique dans une boucle de capteur pour transférer l'énergie thermique aux turbines à cycle de Rankine par l'intermédiaire d'échangeurs de chaleur. Des chaudières à gaz de secours sont employées quand la température de la vapeur est en dessous de celle exigée par les turbines à vapeur. Un système hybride peut être construit en ajoutant des capteurs solaires à une centrale conventionnelle à combustible fossile. La conception rentable du champ de concentrateurs solaires est un aspect clé et est étroitement liée à l'établissement d'une bonne correspondance entre la chaleur solaire, le taux de concentration du concentrateur et les conditions de la centrale .

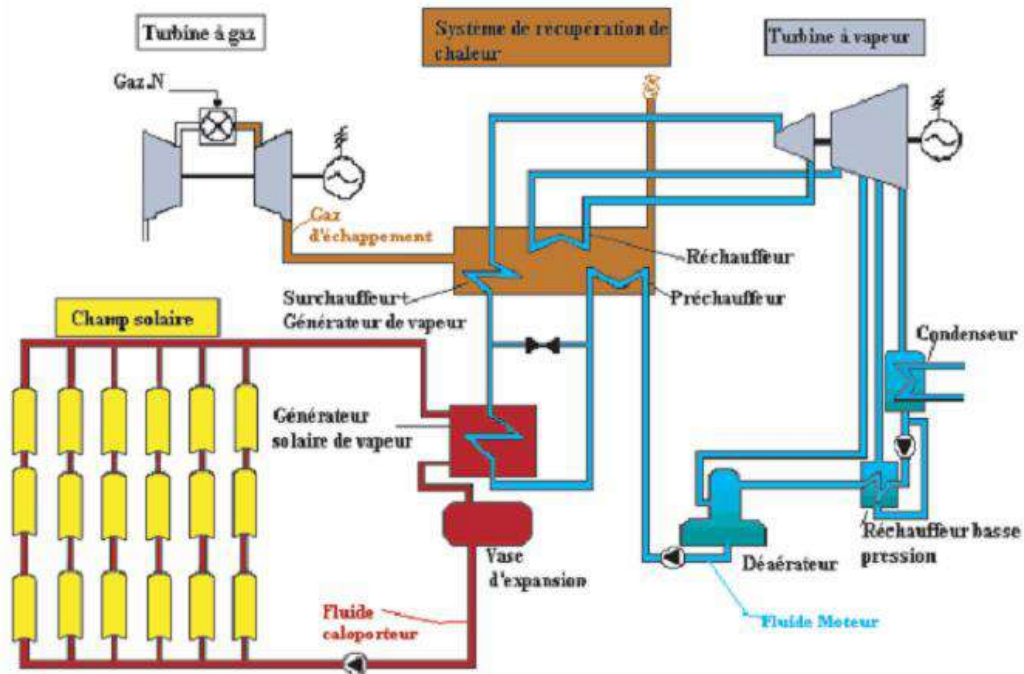


Figure I.16 : Configuration hybride solaire/fossile (cycle combiné).

I.5.2. Stockage de l'énergie thermodynamique

La nature intermittente de l'énergie solaire pose des problèmes de stockage. Il est nécessaire de développer des dispositifs de stockage permettant le transfert d'énergie des périodes excédentaires aux périodes déficitaires et adapté ainsi sa production à sa consommation.

Le stockage constitue un aspect important puisqu'il permet de rendre la production d'électricité constante et indépendante de la disponibilité de rayonnement solaire. En effet, les installations électriques solaires sont confrontées au caractère intermittent et fluctuant de la disponibilité de l'énergie solaire. Le stockage de l'énergie thermique permet ainsi d'obtenir un bon taux d'utilisation.

L'avantage avec le solaire à concentration thermodynamique est que la chaleur peut être stockée dans des sels fondus (il est plus facile de stocker de la chaleur que de l'électricité). Le sel fondu présente en effet une bonne capacité calorifique volumique ($2,4 \text{ joule/} (\text{°Ccm}^3)$, à comparer aux $4,18$ de l'eau)

D'où la nécessité d'intégrer dans le système de génération de puissance un dispositif lui permettant de fonctionner pendant la nuit et pendant les heures d'ensoleillement insuffisant. Dans le cas d'une centrale purement solaire, une production de l'énergie thermique par anticipation obtenue par un procédé de stockage thermique par sels fondus est susceptible d'assurer une meilleure exploitation de la centrale et cela en alimentant en chaleur même durant les périodes de coupures solaires. Le système de stockage à sel fondu peut être configuré de deux manières [11].

I.5.2.1. Système à un seul réservoir

Le stockage thermique peut se faire par l'intermédiaire d'un seul bac vertical de grande hauteur dans lequel se trouve une huile thermique (liquide dense) ou la température est stratifiée. On parle, dans ce cas, de stockage à stratification ou le sel chaud flotte sur le sel froid (Fig I.24).

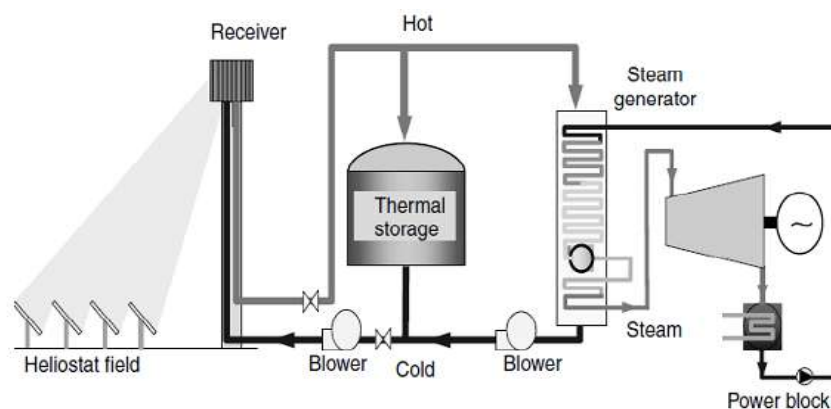


Figure I.17 : Système à un seul réservoir.

I.5.2.2. Système à deux réservoirs

Ce type de stockage est classiquement le plus utilisé ; le système emploie deux bacs ayant chacun une pleine capacité de rétention en sel en circulation. Dans ce cas, l'un des bacs contient du sel froid aux alentours tout de même de 250°C et l'autre le sel chaud (Fig I.25).

L'échangeur solaire est toujours alimenté en chaleur par le réservoir chaud. Les sels fondus sont transférés du réservoir froid au réservoir chaud afin d'accumuler l'énergie excédentaire. La présence d'un système de stockage améliore ainsi les performances du champ solaire, pendant les périodes de faible ensoleillement, car il se comporte comme un amortisseur thermique et évite ainsi le retour des perturbations qui affectent la température à la sortie du champ.

Le champ solaire de la centrale doit donc non seulement alimenter le système de génération électrique (turbine) mais aussi le système de stockage thermique.

Par conséquent, une centrale fonctionne exclusivement en mode solaire nécessite un champ solaire plus important qui va se traduire par un surcoût de production. Alors, une technique qui a fait ses preuves dans le secteur de la production électrique par voie solaire est celle consistant à intégrer dans une centrale solaire classique un système d'appoint en combustible fossile [11].

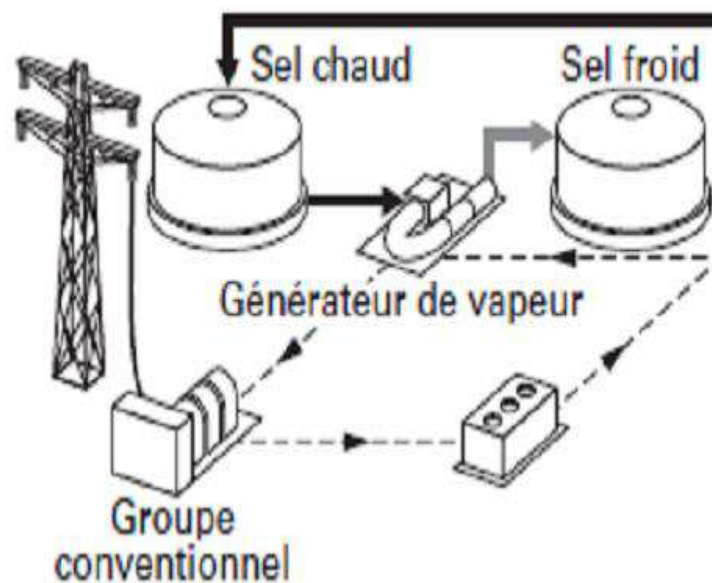


Figure I.18 : Système à deux réservoirs.

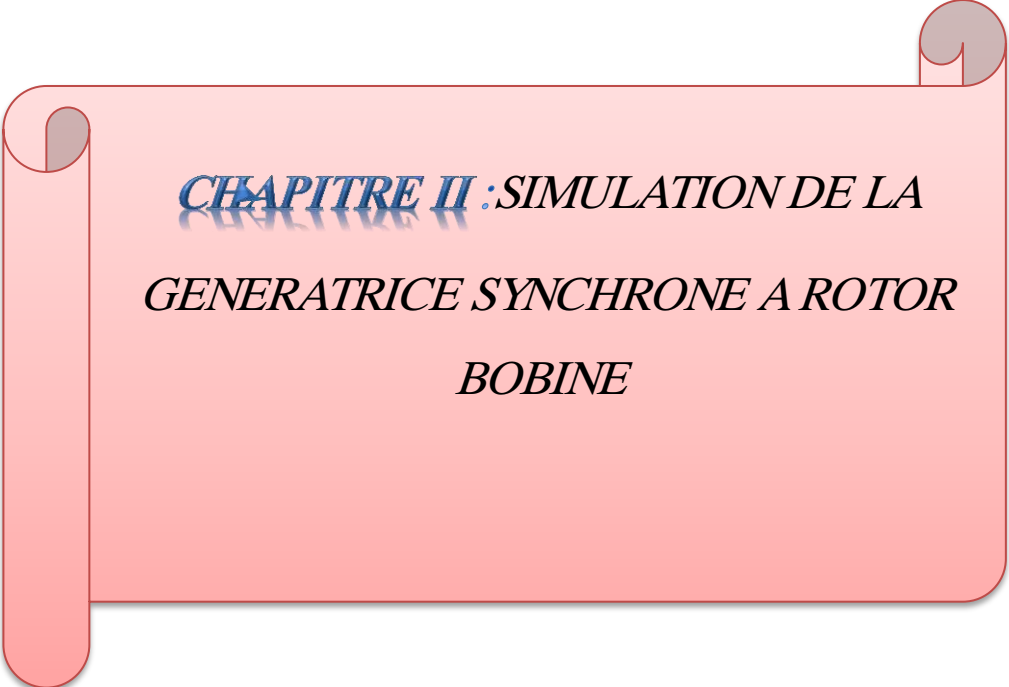
I.5.2.3. Les sels fondus

Les sels fondus sont des milieux liquides, comprenant au moins un type d'anion et de cation, et ne comportant pas de solvants moléculaires. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels les réacteurs nucléaires, l'électrochimie, la métallurgie, le stockage et le transfert d'énergie thermique. Les caractéristiques demandées pour le stockage et le transfert thermique sont :

- Capacité calorifique importante ;
- Conductivité thermique élevée ;
- Plages de température adéquates ;
- Stabilité des propriétés en température ;
- Faible viscosité, pour les transferts ;
- Abondance, coût faible ;
- Non toxique, non inflammable [11].

I.6. Conclusion

Dans ce premier chapitre du mémoire, nous avons abordé quelques généralités sur le l'énergie solaire qui est l'origine de ce travail, le solaire thermodynamique, qui nous importe, est bien expliqué dans ce chapitre, nous avons vu les différents types de centrales thermodynamiques et leurs principe de fonctionnement ainsi que les cycles utilisés pour l'obtention d'électricité d'origine thermodynamiques, nous avons également parlé des configurations hybrides de ces centrales et le stockage d'énergie.



***CHAPITRE II : SIMULATION DE LA
GENERATRICE SYNCHRONNE A ROTOR
BOBINE***

II.1. Introduction

L'électricité peut être produite grâce à des générateurs qui convertissent divers types d'énergie en énergie électrique. La majeure partie de l'énergie électrique qui atteint nos maisons est à l'origine d'une énergie cinétique. Les centrales électrique utilisent des turbine pour convertir l'énergie cinétique en énergie mécanique permettant d'entraîner des génératrices, qui à leur tour convertissent de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans Ce chapitre nous présenterons les différents types des génératrices électriques et nous effectuerons une simulation sous l'environnement MATLAB/ SIMULINK de la génératrice synchrone à rotor bobine.

II.2. Types de génératrices électriques

Les génératrices électriques peuvent être classifiées selon le courant produit, soit un courant continu ou un courant alternatif et selon les différentes configurations pour les deux types.

II.2.1. Génératrice à courant continu

La Génératrice à courant continu permet de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique utile et ceci en présence d'une excitation magnétique .la figure (II,1) décrit la transformation réalisée par la génératrice à courant continu [12]:

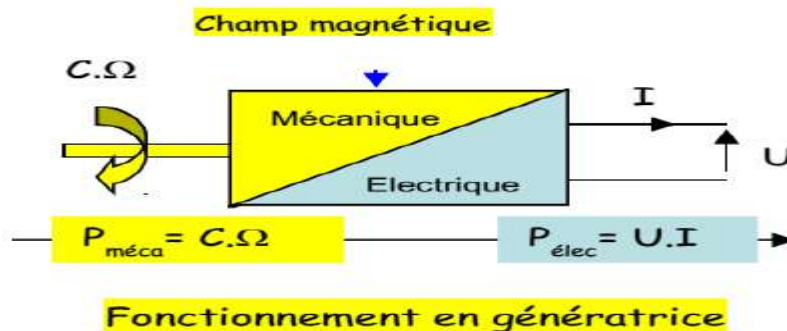
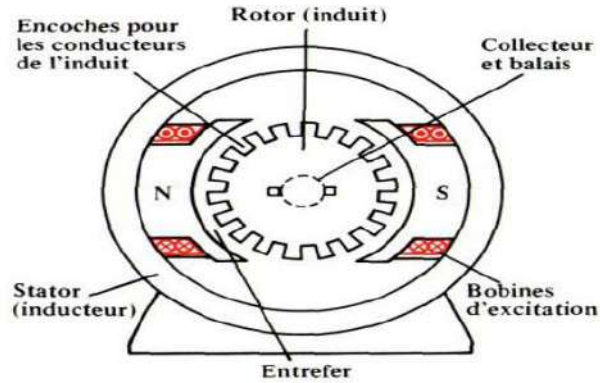


Figure (II,1) : principe de fonctionnement d'une génératrice à courant continu

II.2.1.1. composition d'une génératrice à courant continu :

Une génératrice à courant continu est composé des parties suivantes :

- l'inducteur ou le stator ;
- l'induit ou le rotor ;
- les balais et le collecteur



Figure(II , 2):Constitution de la machine à courant continu

II.2.2. Génératrice à courant alternatif

La génératrice à courant alternatif permet de produire du courant alternatif. Il existe différents types de génératrices à courant alternatif.

II.2.2.1.Génératrice synchrone (alternateur)

Les alternateurs à base des machines synchrones sont la source primaire de toute énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.[13]

II.2.2.2.Construction d'un générateur synchrone

L'alternateur se compose d'une partie fixe qui s'appelle le stator et d'une partie tournante qui s'appelle le rotor (bobine ou à aimants permanents).

- a. **Stator** : Le stator est la partie stationnaire d'un alternateur. Selon la configuration de la machine, le stator peut créer un champ magnétique qui par interaction avec le champ magnétique rotorique produit le couple électromécanique. Le stator peut être constitué d'aimants permanents ou d'électroaimants. [14]
- b. **Rotor** : Le rotor est la partie mobile, par rapport au stator. Il peut être un aimant qui lors de sa rotation induit un champ électrique dans les enroulements du stator de l'alternateur. Il est généralement de deux types de rotor :
 - **Rotor à aimant permanent** :

Les machines synchrones à aimant permanent (MSAP) sont de plus en plus utilisées dans de nombreux domaines grâce à leur efficacité énergétique, leur simplicité de mise en œuvre et leur performance dynamique. La sûreté de fonctionnement de ce type d'actionneurs devient cependant un

problème critique pour certaines applications industrielles car, à cause de la présence d'une excitation permanente des aimants au rotor .[14]



Figure(II , 3):rotor de type à aimant permanente

Les MSAP peuvent être construites avec plusieurs configurations rotoriques. Leur classification globale en termes de placement des aimants est le suivant :

- ❖ Aimants en surface ;
- ❖ Aimants insérés ;
- ❖ Aimants enterrés ;
- ❖ Aimants à concentration de flux.
- **rotor bobiné**

Ce genre de machines est constitué d'un rotor qui comporte des bobines .On alimente ces bobines par des courants continus par l'intermédiaire des contacts glissant balais-bagues pour générer le flux inducteur dans l'entrefer.

On distingue deux types de machines synchrones à rotor bobiné :

- ❖ Les machines à pôles lisses
- ❖ Les machines à pôles saillants

Le rotor peut être à pôles lisses ou à pôles saillants, selon la vitesse de rotation. Pour des vitesses très élevée, la vitesse périphérique du rotor est très élevée, on fait généralement appel aux pôles lisses, pour des raisons de résistance mécanique du rotor et de meilleure répartition et fixation de bobinage sur la surface du rotor. Si la vitesse périphérique du rotor diminue, les MS sont alors à pôles saillants de construction plus simple.[15]



Figure(II , 4):rotor à pôles saillants

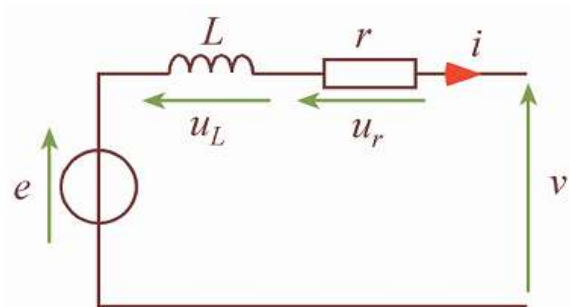


Figure(II , 5):rotor à pôles lisses

II.2.3.3. Principe de fonctionnement

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statorique. Les forces-électro-motrices (f-é-m) dans ces bobinages provoquent la circulation des courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer qui tourne à la même vitesse que celui de champ inducteur.[13]

II.2.3.4. Schéma équivalent des alternateur :



Figure(II , 6):schéma équivalent des alternateurs

e : f.é.m. à vide (V)

v : tension aux bornes d'un enroulement de la machine (V)

r : résistance de l'enroulement (Ω)

$X = L.\omega$: réactance synchrone (Ω)

Le courant est orienté en « convention générateur » loi des mailles :

$$e = U_L + U_r + V$$

II.2.3.4. Domaine d'utilisation des alternateurs

Les alternateurs sont très utilisés dans la production d'énergie électrique dans les différentes centrales électriques comme :

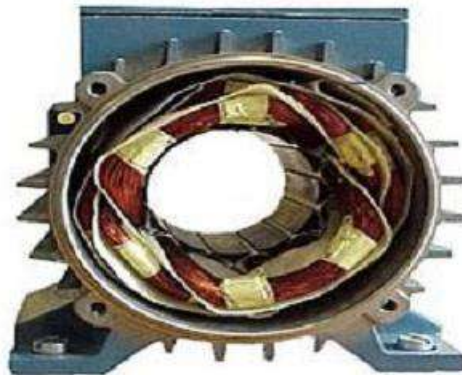
- ❖ Les centrales thermodynamiques (centrales à tour)
- ❖ Les centrales hydrauliques
- ❖ Les centrales éoliennes
- ❖ Les centrales nucléaires
- ❖ Les centrales thermiques

II.2.3. Génératrice asynchrone

II.2.3.1. Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée essentiellement de deux armatures.

Une armature fixe appelée stator, qui porte dans ses encoches régulièrement réparties sur sa face interne trois enroulements identiques à p paires de pôles dont leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique de $2\pi/3$ [16].



Figure(II , 7):stator de machine asynchrone

Une armature mobile autour de l'axe de symétrie de la machine appelé rotor. On distingue deux types :

On distingue deux types :

- * la machine à rotor bobiné
- * la machine à rotor à cage d'écureuil.

II.2.4. Entraînement des génératrices électrique

L'entraînement des génératrices électriques est assuré par des turbines dont le domaine de production électrique.

Turbine à vapeur et turbine à gaz

Sont des turbines fonctionnant selon le cycle thermodynamique utilisées dans les centrales électriques thermiques. La turbine à vapeur utilise la vapeur à haute pression comme fluide de travail, tandis que la turbine à gaz utilise de l'air ou un autre gaz comme fluide de travail. [17]



Figure(II , 8):turbine à vapeur



Figure(II , 9):turbine à gaz

II.2.5. Bilan de puissance

Le schéma de puissance suit le mécanisme de conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique, de sorte que les turbines convertissent l'énergie cinétique (vapeur, eau, vent) en énergie mécanique, qui est convertie par le générateur en énergie électrique, puis stockée dans des batteries ou connectée au réseau électrique figure (II ,19).

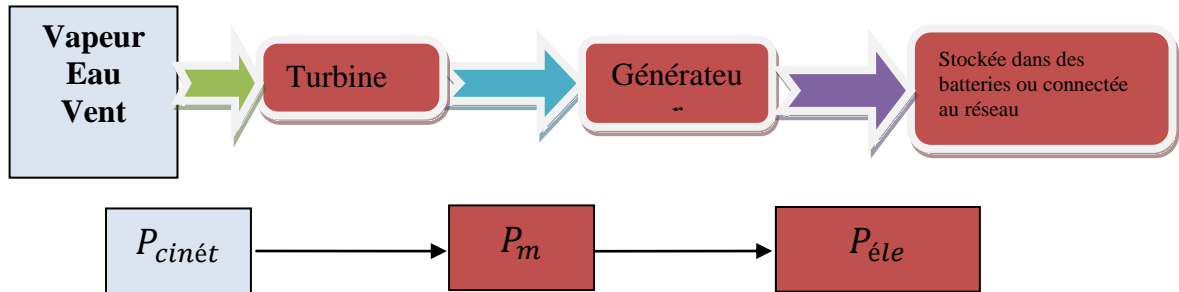


Figure II .10 : Bilan de puissance de la production électrique

II.3. Modélisation de la génératrice synchrone à rotor bobiné

Pour les machines électriques tournantes, la modélisation nécessite une parfaite connaissance de la structure électrique et de la structure mécanique (masse tournante, couple résistant, frottement visqueux).

La structure de la machine synchrone à rotor bobiné comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation est créée par une excitatrice à courant continu au niveau de rotor, et dans notre travail on prend une machine non amortie (sans enroulement amortisseurs).

II.3.1. structure générale d'une machine synchrone à rotor bobiné

La structure électrique d'une MSRBT triphasé est constituée au stator d'un enroulement triphasé montré par les trois axes (a, b, c) et au rotor d'un enroulement rotorique parcouru par un courant d'excitation. La figure (II.11) montre le modèle du générateur synchrone à rotor bobiné qui sera développé dans notre travail.

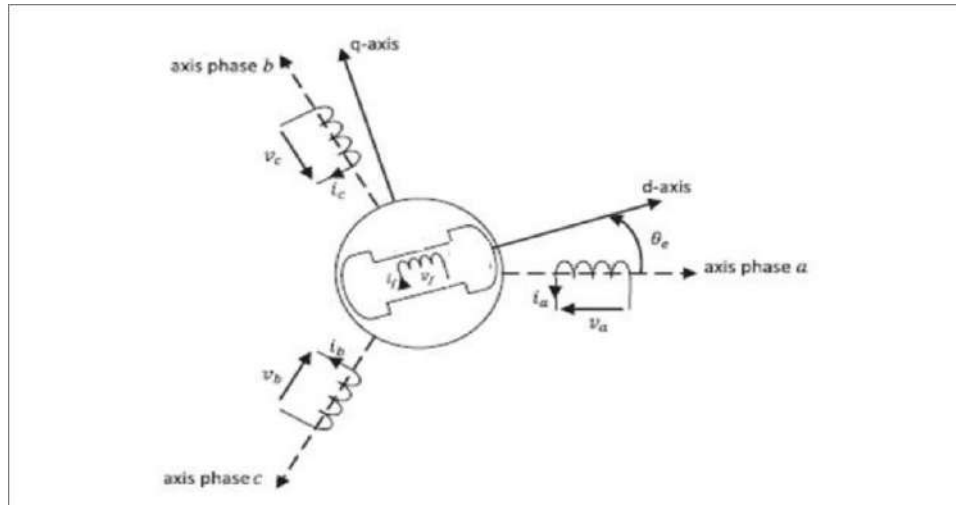


Figure II.11: Schéma représentatif de générateur synchrone à modéliser

Le stator comporte trois phases a, b, c identique et décalé l'une par rapport à l'autre par un angle ($\frac{2\pi}{3}$) électrique de par contre le rotor comprend deux axes caractérisés par :

- Un axe d'animation rotorique longitudinal (d).
- Un axe inter-polaire en quadrature (q), déphasé de ($\frac{\pi}{2}$) par rapport à l'axe (d).
- La position du rotor est localisée par l'angle électrique : $\theta = \theta_0 + \omega t$

II.3.2. Hypothèses simplificatrices

- Les enroulements du stator sont symétriques et ont une distribution sinusoïdale parfaite le long de l'entrefer.
- La perméance des chemins magnétiques sur le rotor est indépendante des positions du rotor.
- Les effets de saturation et d'hystérésis sont inexistant.

II.3.3. Mise en équation de la machine.

La théorie des modèles des machine électrique les plus utilisée est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statorique et rotorique à un système cartésien d'axes, d et q dans le repère classique.

II.3.3.1 Equations électriques.

Les équations de tension des phases rotorique servent au point de départ pour l'élaboration du modèle de la machine. Le système des équations suivant exprime les tensions en fonction des courant et des flux.

$$\begin{cases} V_a = -R_s I_a + \frac{d}{dt} \phi_a \\ V_b = -R_s I_b + \frac{d}{dt} \phi_b \\ V_c = -R_s I_c + \frac{d}{dt} \phi_c \\ V_f = -R_f I_f + \frac{d}{dt} \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

La forme matricielle du système est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{dy}{dx} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$V_f = R_f I_f + \frac{d}{dt} \phi_f \quad (\text{II.3})$$

II.3.3.2. Equation magnétique

La partie magnétique est représenté par les équations suivantes :

$$\phi = L \cdot I \rightarrow \begin{cases} \phi_a = L_a I_a + M_{ab} I_b + M_{ac} I_c + M_{af} I_f \\ \phi_b = M_{ba} I_a + L_b I_b + M_{bc} I_c + M_{bf} I_f \\ \phi_c = M_{ca} I_a + M_{cb} I_b + L_c I_c + M_{cf} I_f \\ \phi_f = M_{fa} I_a + M_{fb} I_b + M_{fc} I_c + L_f I_f \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$\begin{cases} M_{af} = M_f \cos(\phi) \\ M_{bf} = M_{bf} \cos\left(\phi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cf} = M_{cf} \cos\left(\phi - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Donc la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M & M & M \\ M & L & M & M \\ M & M & L & M \\ M & M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

II.3.4. Passage dans le repère de Park

La simplification du modèle dynamique de la machine peut être faite par l'application d'un changement du repère. Grâce à une transformation mathématique, on peut effectuer ce changement, alors elle transforme les trois bobines statorique déphasées de $(\frac{2\pi}{3})$ en deux bobines fictives équivalentes diphasées $(\frac{\pi}{2})$ et situées sur le rotor.

Les deux bobines sur les axes (d, q) tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer du repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine.

La figure (II.5) montre le modèle de générateur synchrone à rotor bobiné dans le repère de Park.

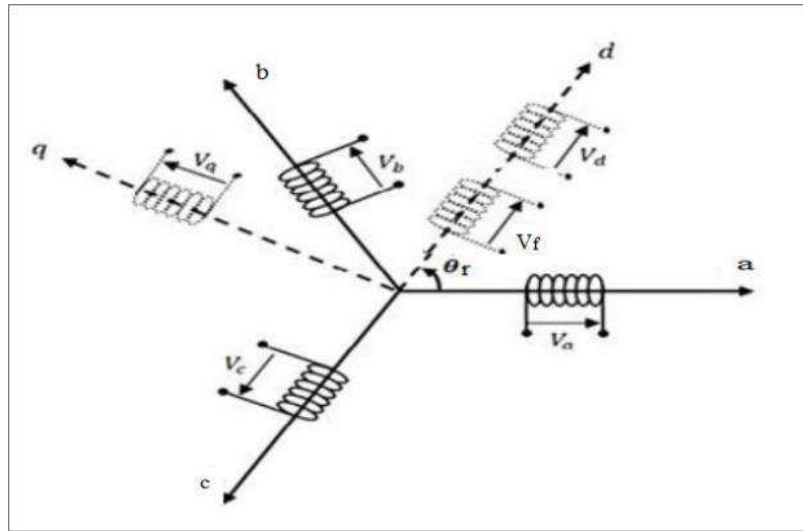


Figure II.12: Transformation triphasé - diphasé

La matrice de Park est définie comme suit

$$P(\theta_r) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

Pour passer du repère (d, q, o) vers (a, b, c) il faut utiliser la matrice inverse de Park $P(\theta_r)^{-1}$ définie comme suit :

$$P(\theta_r)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

Le passage des grandeurs statorique $X_{a,b,c}$ aux composants directe et en quadratures $X_{d,q}$ est défini par :

$$[X_{a,b,c}] = [P(\theta_r)]^{-1} [X_{d,q,o}] \quad (\text{II.9})$$

Ou:

$$[X_{d,q,o}] = [P(\theta_r)] [X_{a,b,c}]$$

$[P(\theta_r)]$ et $[P(\theta_r)]^{-1}$: sont les matrices de passage direct et inverse.

X : les vecteurs de courant, tension ou flux.

θ_r : l'angle de la position de rotor.

II.3.5.choix du référentiel

Différentes possibilités existent pour choisir la direction du repère d'axes d, q qui dépendent couramment des objectifs de l'application. L'angle électrique θ est défini comme suit :

$$\theta(t) = \int_a^t \omega(t) dt \quad (\text{II.10})$$

Sachant que l'angle électrique initial $\theta_0 = 0$

Tel que :

On distingue selon le choix de ω , les référentiels suivants :

a- Référentiel lié au stator

Le stator est fixe, alors la vitesse du repère de Park est nulle comme illustre l'équation suivante

$$\omega_\theta = \omega_s = 0$$

b- Référentiel lié au rotor

Dans le référentiel lié au rotor, la vitesse du repère (d, q) est égale à celle du rotor:

$$\omega_\theta = \omega_r$$

c- Référentiel lié au champ tournant

Dans le référentiel lié au champ tournant, la vitesse du repère de Park est égale à la vitesse du champ tournant :

$$\omega_\theta = \omega$$

II.3.6.Modèle de la machine synchrone à rotor bobine dans le repère de Park.

Par l'application de la transformation de Park sur le système d'équations dans un repère lié au rotor, les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques sont définies comme suit :

II.3.6.1.Equations électriques

Les équations électriques sont données comme suit:

$$\begin{cases} -V_d = +R_s I_d + \omega_r \Phi_q - \frac{d\Phi_d}{dt} \\ -V_q = +R_s I_q - \omega_r \Phi_d - \frac{d\Phi_q}{dt} \\ V_f = R_f I_f + \frac{d\Phi_f}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

II.3.6.2. Equations magnétiques

Les équations magnétiques sont données comme suit:

$$\begin{cases} \Phi_d = -L_d I_d + M_{sf} I_f \\ \Phi_q = -L_q I_q \\ \Phi_f = -L_f I_f + M_{sf} I_d \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

II.3.6.3. Expression du couple électromagnétique

La puissance transmise est exprimée par la relation suivante:

$$P(t) = (V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$V_d = -R_s I_d - \omega_r \Phi_q + \frac{d\Phi_d}{dt}$$

$$V_q = -R_s I_q + \omega_r \Phi_d + \frac{d\Phi_q}{dt}$$

En remplace (V_d , V_q) par leur expression dans l'équation :

$$P(t) = \left(-R_s I_d - \omega_r \Phi_q + \frac{d\Phi_d}{dt} \right) I_d + \left(-R_s I_q + \omega_r \Phi_d + \frac{d\Phi_q}{dt} \right) I_q \quad (\text{II.14})$$

$$P(t) = [-R_s (I_d^2 + I_q^2) + \left(\frac{d\Phi_d}{dt} I_d + \frac{d\Phi_q}{dt} I_q \right) + (-\omega_r \Phi_q I_d + \omega_r \Phi_d I_q)] \quad (\text{II.15})$$

$$\text{On a : } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

Donc l'expression devient :

$$P(t) = [-R_s (I_d^2 + I_q^2) + \left(\frac{d\Phi_d}{dt} I_d + \frac{d\Phi_q}{dt} I_q \right) + \frac{d\theta_r}{dt} (-\Phi_q I_d + \Phi_d I_q)] \quad (\text{II.16})$$

Sachant que :

$$P = C_{em} \Omega \quad \text{et} \quad \omega = p \Omega.$$

On déduit l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = p (\Phi_d I_q - \Phi_q I_d) \quad (\text{II.17})$$

Donc :

$$C_{em} = p ((L_d - L_q) I_d I_q + \Phi_f I_q)$$

$p (\Phi_f I_q)$: Couple que l'on obtiendrait avec une machine à pôles lisses

$p ((L_d - L_q) I_d I_q)$: Couple supplémentaire dû à la saillance des pôles.

II.3.6.4. Equations mécanique

Le modèle mécanique de la machine synchrone est illustré comme suit :

$$C_m - C_{em} - C_f = j \frac{d\omega_r}{dt} \quad (II.18)$$

II.4. simulation par Matlab :

Sous l'environnement Matlab on a effectué la simulation de la génératrice synchrone à rotor bobine en lui appliquant deux charges. Le premier cas avec une charge résistive et le deuxième une charge RL. Le schéma bloc de la simulation est donné par la figure (II.13).

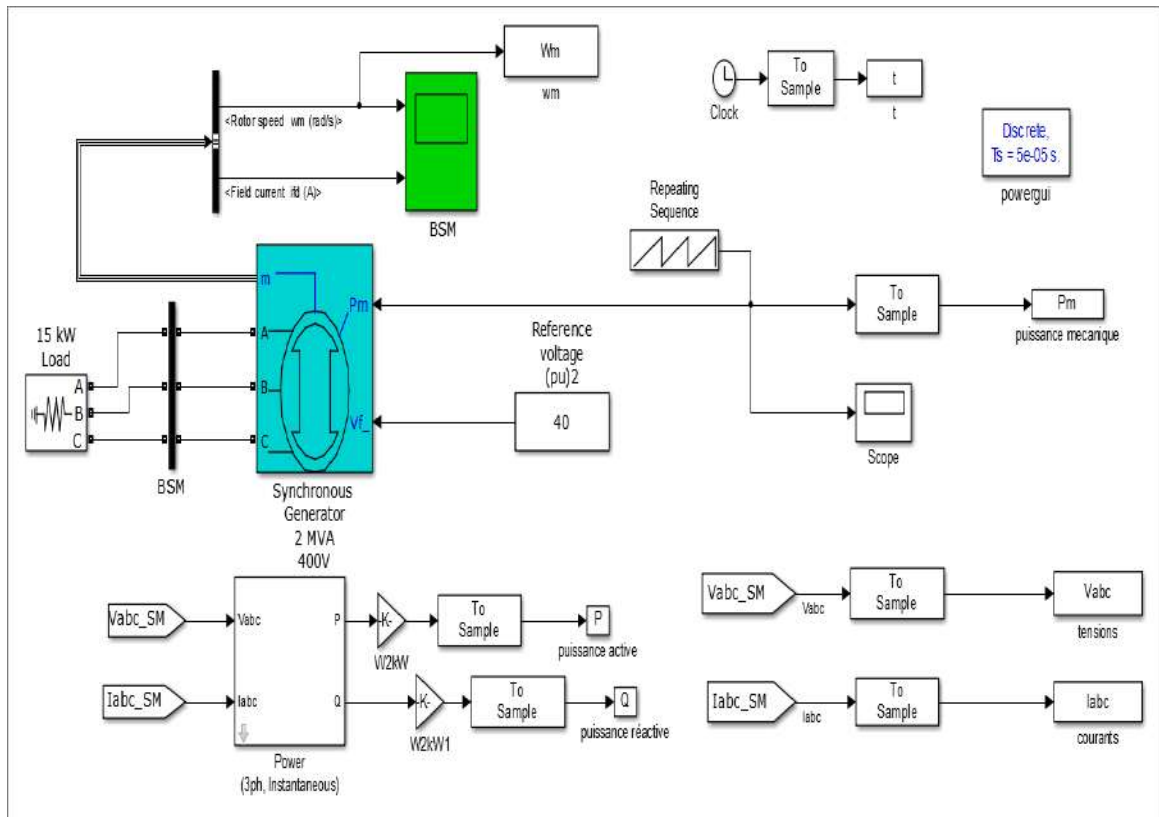


Figure (II.13) : Schéma simulation de génératrice synchrone a rotor bobine

Le Parametre de la génératrice synchrone à rotor bobine :

<i>Parametre de la machine synchrone a rotor bobine</i>	
<i>Puissance nominal (w)</i>	<i>12000</i>
<i>La tension nominal (v)</i>	<i>460</i>
<i>Fréquence (Hz)</i>	<i>60</i>
<i>Rs (ohm)</i>	<i>1.62</i>
<i>LI (H)</i>	<i>0.004657</i>
<i>Lmd (H)</i>	<i>0.1086</i>
<i>Lmq (H)</i>	<i>0.05167</i>
<i>Rf (ohm)</i>	<i>1.163</i>
<i>Llfd (H)</i>	<i>0.01143</i>

Tableaux(II ,3) : *Parametre de la génératrice synchrone à rotor bobine*

II.4.1 Charge résistive R :

Pour étudier le fonctionnement de la génératrice synchrone à rotor bobiné nous avons simulé le système en la connectant à une charge résistive. Les résultats de simulation sont présentés sur les Figures (II.14,15,16,217,18).

La figure (II.14) représente la variation de la vitesse de la génératrice qui commence par un régime transitoire qui devient permanent à partir de $t= 0.7s$ avec une vitesse de 80 rd/s.

La figure (II.15) représente la puissance mécanique appliquée à la génératrice $P_m= 14 kW$.

La figure (II.16) présente les trois tensions composées V_a , V_b , et V_c . On remarque que les trois tensions sont parfaitement sinusoïdales et périodiques , en passant par le régime transitoire la valeur max de la tension se stabilise à $t= 0.7 s$ et elle atteint une valeur de $U_{max} = 325 V$.

La figure (II.17) présente la variation des trois courant I_a , I_b et I_c . On remarque que les trois courants ont une forme parfaitement sinusoïdale et périodique. après le régime transitoire le courant de phase se stabilise à $t= 0.7 s$ avec une valeur maximale de $I_{max}= 23 A$.

La figure (II.18) présente la puissance active P produite par la génératrice. La variation de la puissance passe par un régime transitoire et à $t= 0.7s$ elle se stabilise a la valeur 13kW.

La figure (II.19) présente la puissance réactive Q produite par la génératrice qui strictement nulle ce qui est naturel car la charge est purement résistive

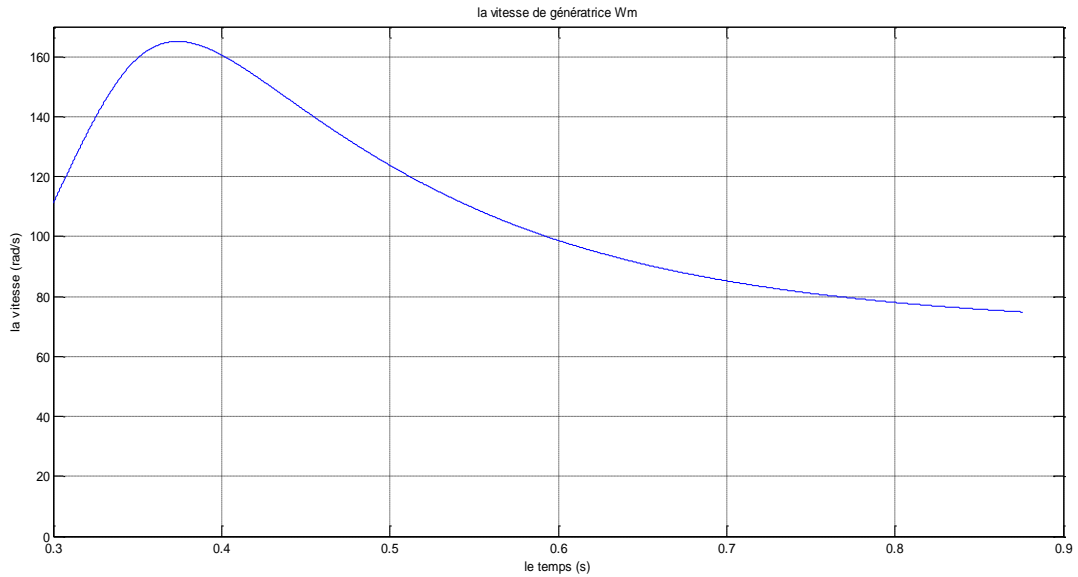


Figure (II.14) :La vitesse de génératrice V (rad/s)

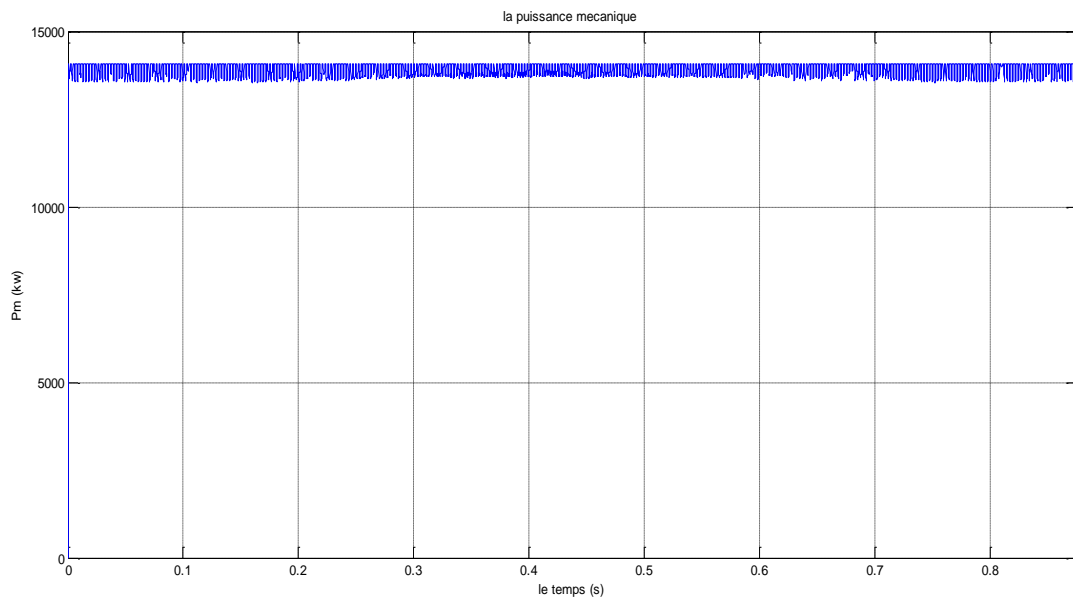


Figure (II.15) : La puissance mécanique $P_m(W)$ à l'entrée de la génératrice

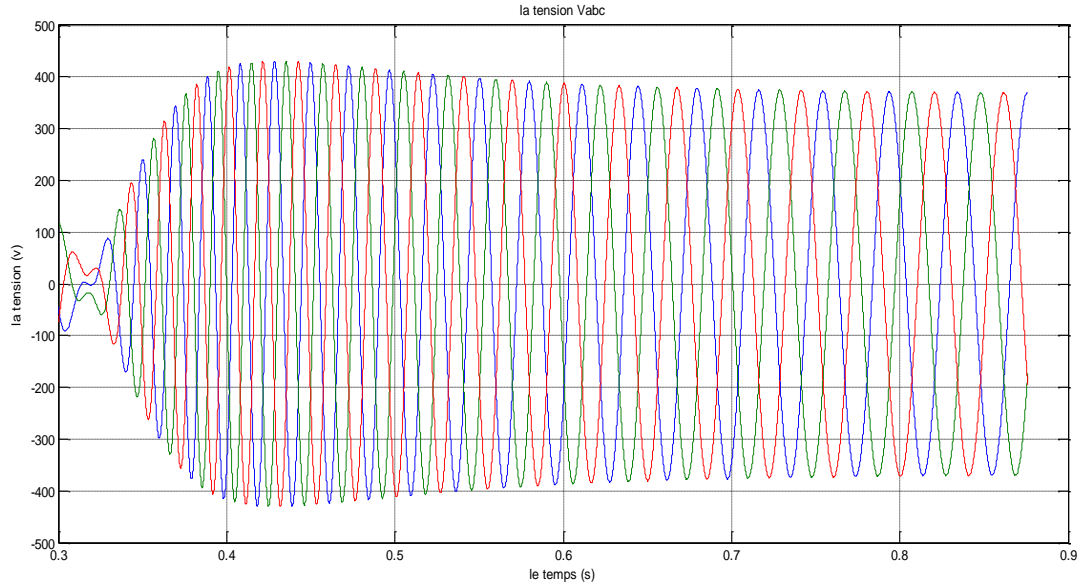


Figure (II.16) : les tensions V abc

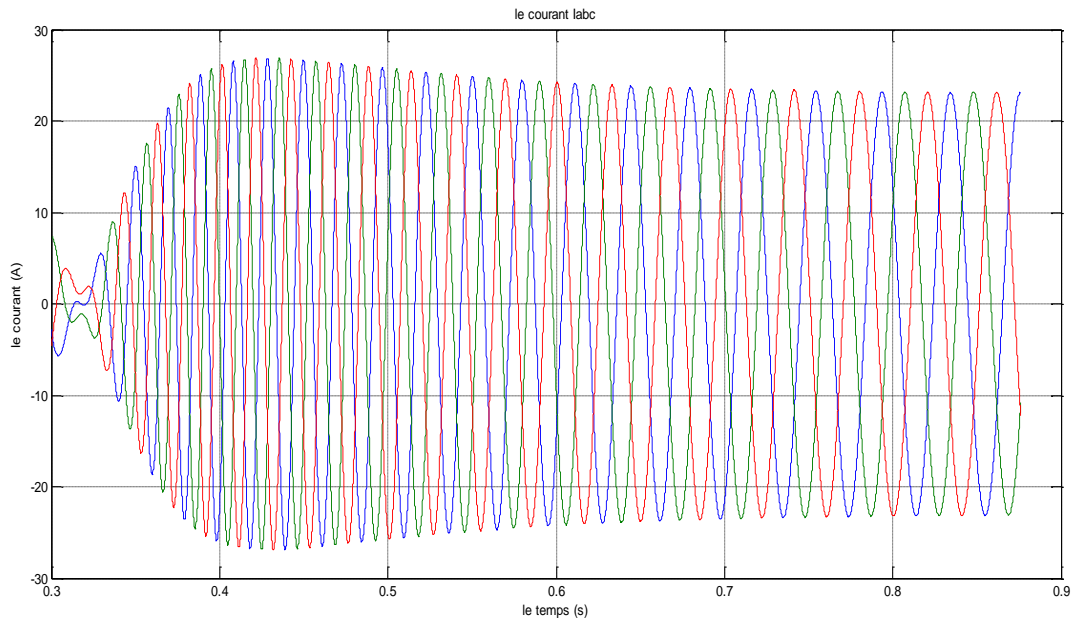


Figure (II.17) : Les courants de la génératrice Iabc

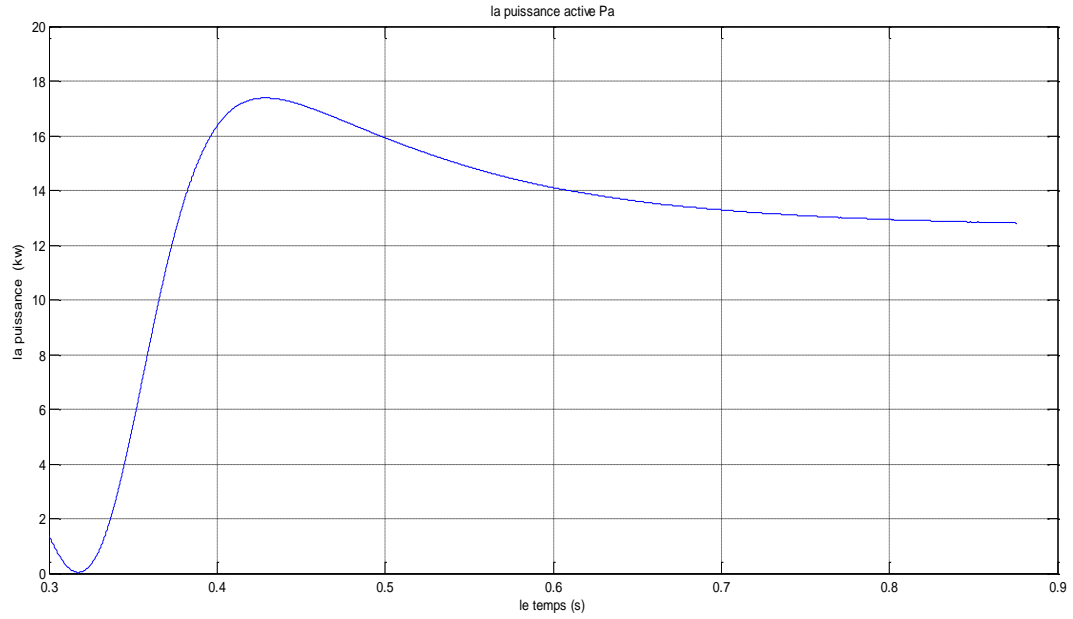


Figure (II.18) : La puissance active P_a (KW)

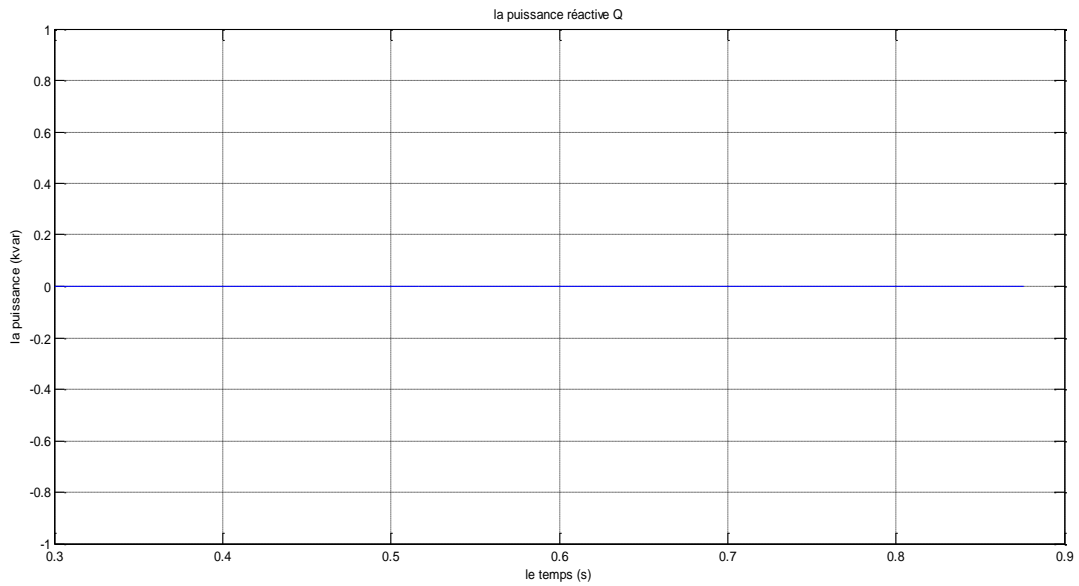


Figure (II.19) : La puissance réactive Q_r (KVA) :

II.4.2 Charge inductive (RL)

Dans le deuxième cas nous avons étudié le fonctionnement de la génératrice synchrone débitant sur une charge RL. Les résultats de simulation sont représentés par la figures (II.20,21,22,23,24).

Nos remarquons que les résultats sont les que ceux obtenus dans le cas de la charge R, mais en remarque que le régime transitoire est un peu plus long. On voit que le régime permanent commence à partir de $t= 1s$.

On remarque aussi que l'introduction d'une charge inductive entraîne une consommation de l'énergie réactive $Q = 5 \text{ kVA}$, ce qui est illustré à la figure(II.23).

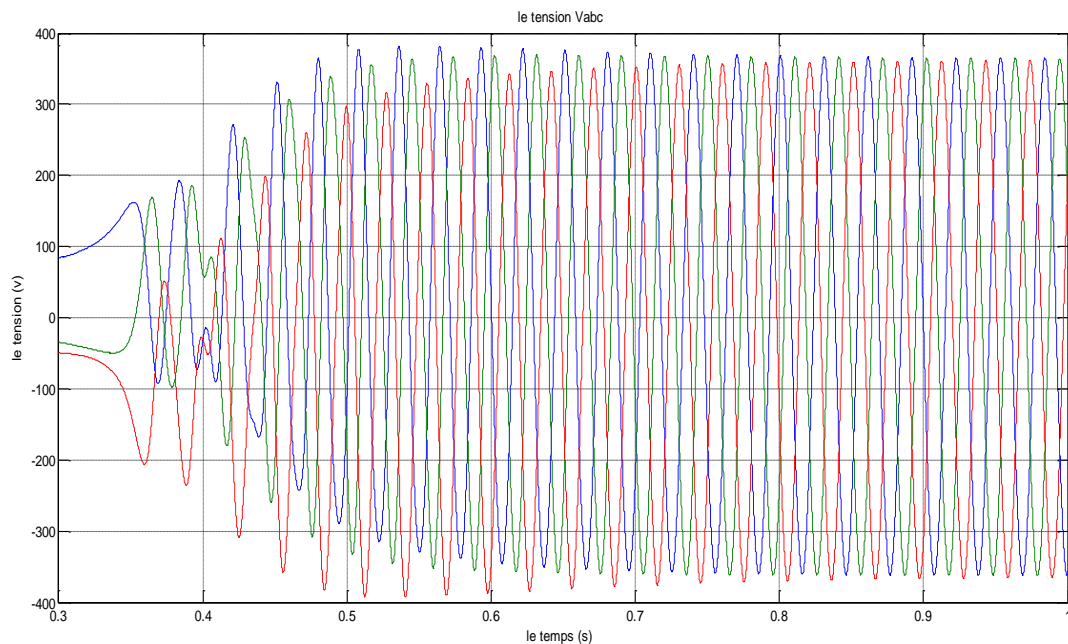


Figure (II.20) : les tensions V abc

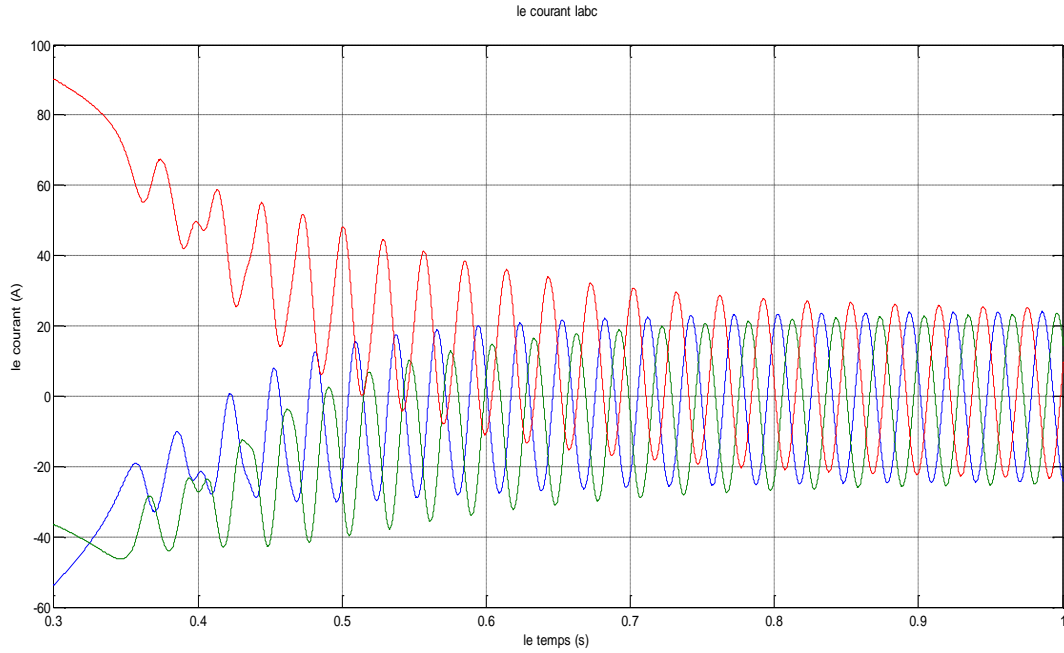


Figure (II.21) : Les courants de la génératrice Iabc

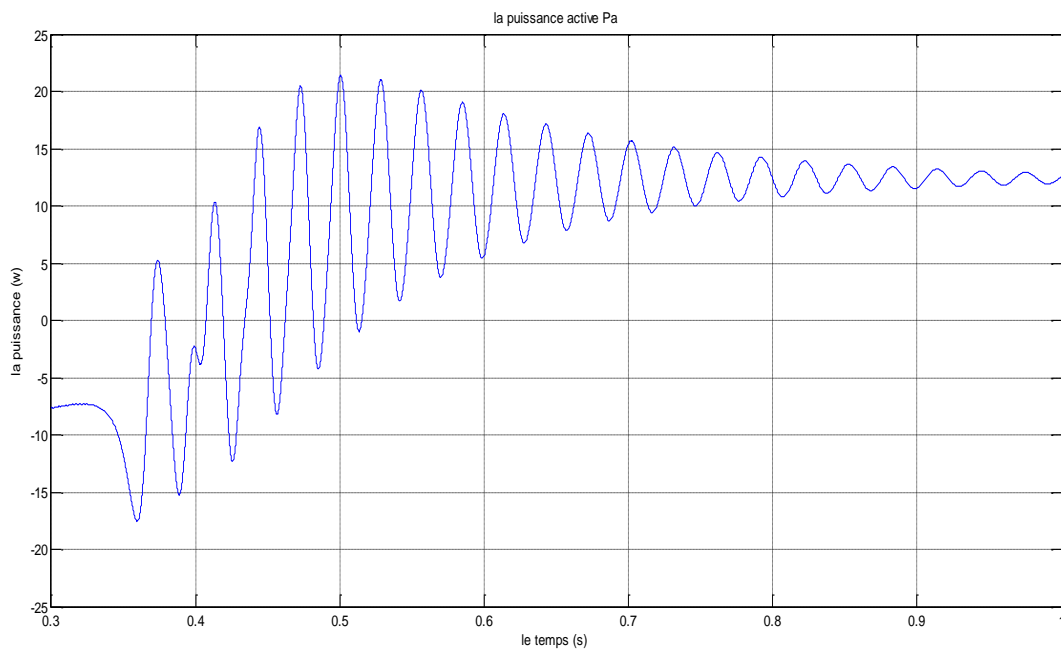


Figure (II.22) : La puissance active Pa(KW)

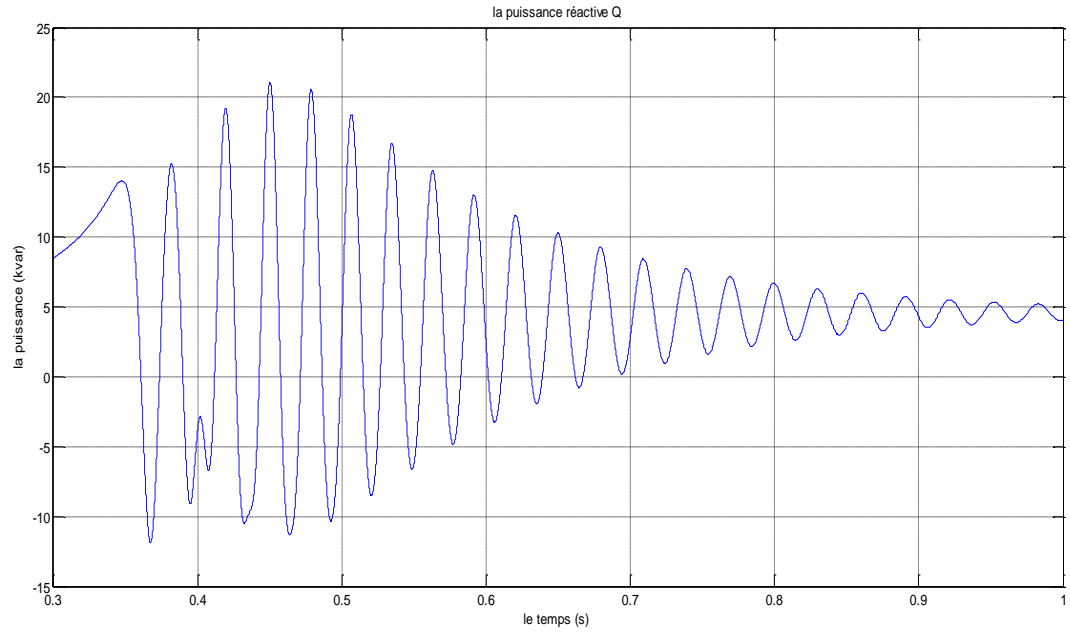


Figure (II.23) : La puissance réactive Q_r (KVA)

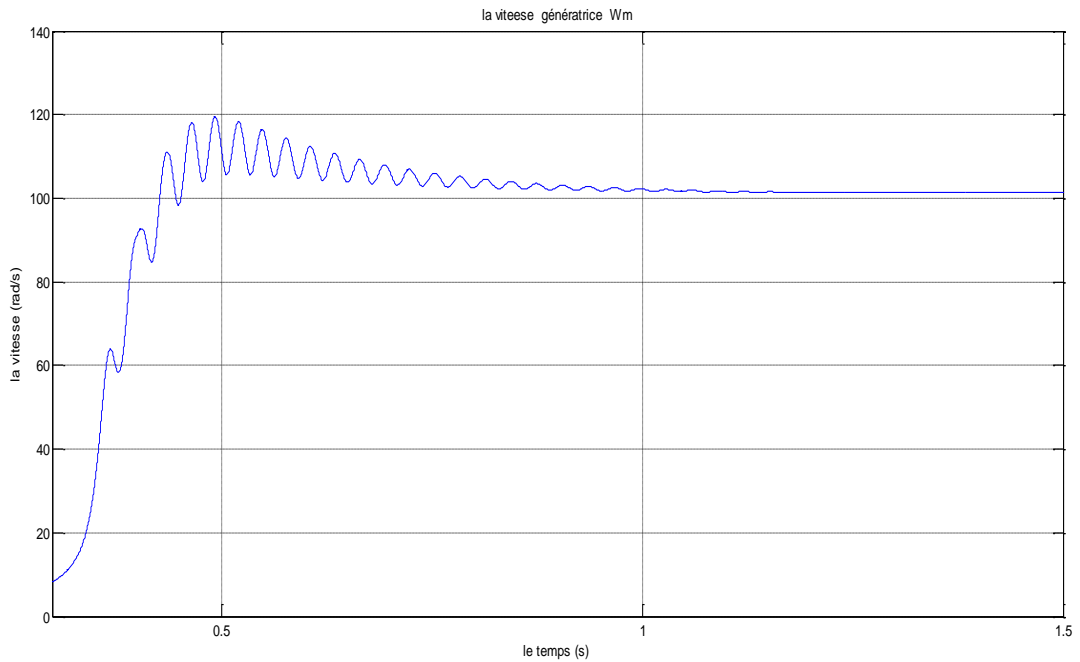



Figure (II.24) : La vitesse de génératrice V (rad/s)

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la génératrice synchrone à rotor bobiné et à l'aide du logiciel (MATLAB/SIMULINK) on a essayé de voir la variation du comportement de cette génératrice connectée à des charge différentes. L'étude a montré que cette génératrice peut produire des tensions et des courant parfaitement valide et convenable à la charge alimenté.



**CONCLUSION
GENERALE**

CONCLUSION GENERALE

En raison de sa localisation et de ses importantes ressources énergétiques, l'Algérie a connu un développement important dans le domaine de la production d'électricité par l'exploitation de différentes sources non renouvelables et sources renouvelables en particulier la source solaire.

Ce travail a porté sur deux objectifs :

- Le premier c'est la présentation des différentes centrales solaire de production d'électricité principalement les centrales à tour solaire dans lesquelles le rayonnement est concentré par des miroirs pour augmenter la chaleur afin de générer de la vapeur qui sert à faire fonctionner des turbines entraînant à leur tour des alternateurs.
- Le deuxième objectif a consisté en la présentation des différentes génératrices de production d'électricité avec une étude par simulation de la génératrice synchrone à rotor bobiné en lui appliquant dans un premier cas une charge résistive et dans le deuxième cas une charge RL.

D'après les résultats de simulation dans lesquelles on a présenté les tension , les courant et la puissance active et réactive fourni à la charge considérée, on peut dire que la génératrice synchrone produit une tension et un courant compatible à la consommation de la charge appliquée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] M. Asma, L.Messaouda, dirigé par : Dr S.Lazher et Dr Y. Fatiha 'étude expérimentale pour la détermination de la courber caractéristique d'un cuiseur solaire parabolique testé sous climat aride de Ghardaïa', Univ Batna 2 faculté de technologie.
- [3] ÉLABORATION DE PROGRAMMES EN ÉNERGIE SOLAIRE'DÉVELOPPEMENT DE L'ÉNERGIE SOLAIRE', 7 novembre 2007, Demande R-3671-2008 AEE-9, Document 4
- [4] «GESTION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE», Mémoire de Master, UNIVERSITÉ ABDERAHMANE MIRA DE BEJAÏA 2016
- [5] S. PETIBON « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », université de Toulouse, 2009.
- [6] : B.Rivoire, Le solaire thermodynamique, CNRS, France, avril 2002.
- [7]:R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, Le, Le rayonnement solaire, Conversion thermique et application, Technique et documentation LA VOISIER, France, 250 pages, 1983.
- [8] : Ch, Perrin de Brichambaut; C, Vauge. Le gisement solaire, Technique et Documentation, Paris. (1982).
- [9] : Burisch, M., et al., Experimental Validation of Theoretical Heliostat Wind Loads. Energy Procedia, 2015. 69: p. 50-59.
- [10] : Kolb, G.J., et al., Power tower technology roadmap and cost reduction plan. SAND2011-2419, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2011. 7.
- [11] : A. Khedim, L'énergie solaire utilisation thermique et photovoltaïque, ANEP, Algérie, 359 pages, 2005.
- [12] BEKKOUCHE- TOUGGOURTI «Étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu» mémoire de Master, université d'Ouargla 2015/2016
- [13]H.Hamichi –F.Benkerrou « Etude et modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent » mémoire de Master université, de Bejaia 2014-2015
- [14]D.Khalifa- A.Boutiche « Commande de la puissance injectée par un générateur synchrone connecté au réseau électrique» mémoire de Master, université M'SILA 2016 /2017
- [15] A.SAHLI,L.OURARI « réglage et contrôle de la vitesse de la machine synchrone a aimant permanent » mémoire de Master, université BEJAIA 2014 / 2015.

[16] M.BENSLIMANE ,D.HADFI « Etude et modélisation d'une génératrice asynchrone double cage » mémoire de Master, université d'Ouargla 2015/2016.

[17] [<https://fr.sawakinome.com/articles/mechanics/difference-between-gas-turbine-and-steam-turbine.html>]