

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



MEMOIRE

DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENSTION DU

DIPLÔME D'INGENIEUR D'ETAT EN

ELECTROTECHNIQUE

OPTION : MACHINES ELECTRIQUES

THEME

SIMULATION DE L'EXCITATRICE STATIQUE DU TURBOALTERNATEUR DE LA CENTRALE D'EL HAMMA II

PROPOSE PAR

Mm: M .BAYOU

SONELGAZ

CENTRALE D'EL HAMMA II

DERIGE PAR

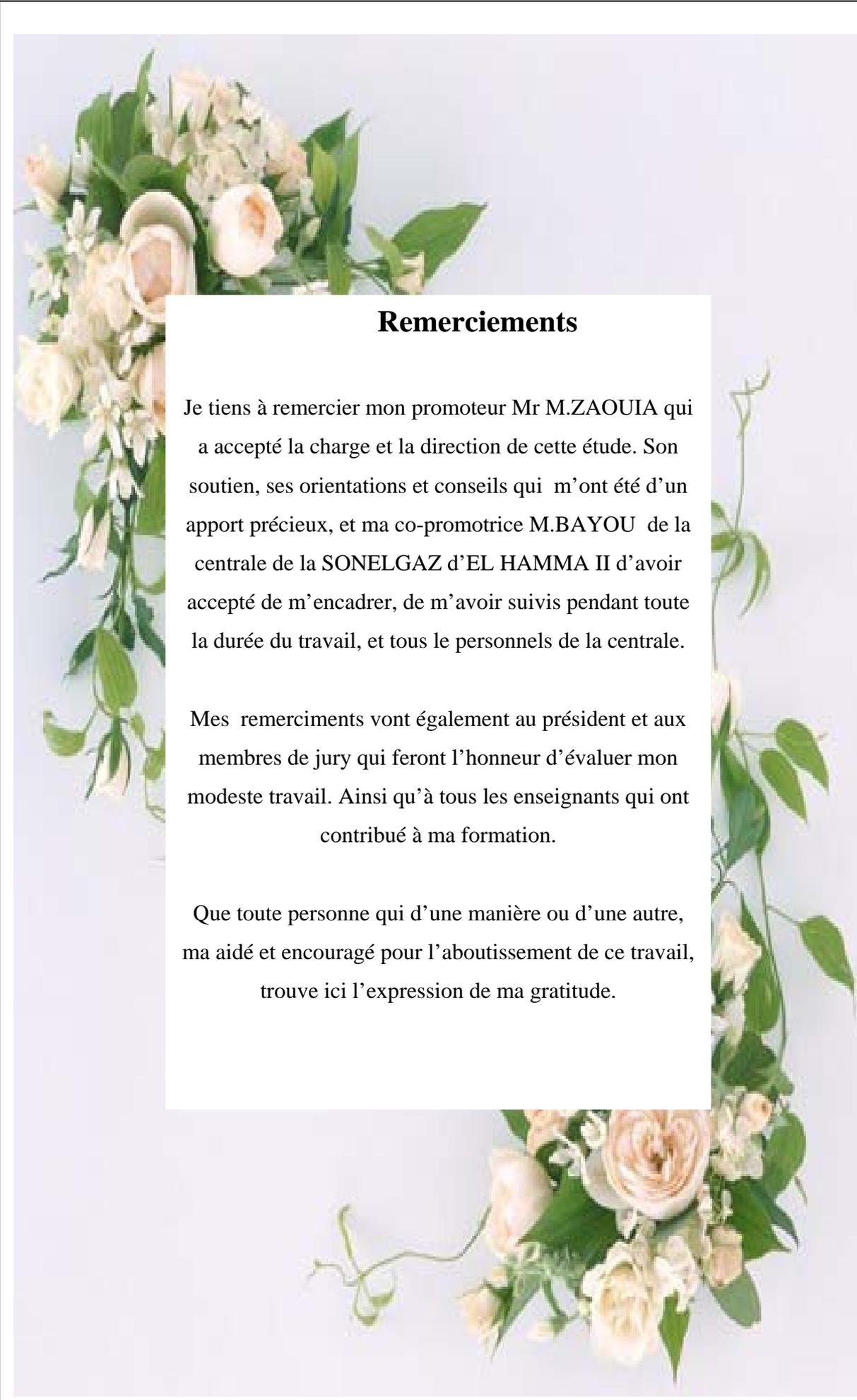
Mr: M.ZAOUIA

Mm: M .BAYOU

ETUDIE ET REALISE PAR

Mr: Y.DILEM

Promotion: 2008



Remerciements

Je tiens à remercier mon promoteur Mr M.ZAOUIA qui a accepté la charge et la direction de cette étude. Son soutien, ses orientations et conseils qui m'ont été d'un apport précieux, et ma co-promotrice M.BAYOU de la centrale de la SONELGAZ d'EL HAMMA II d'avoir accepté de m'encadrer, de m'avoir suivis pendant toute la durée du travail, et tous le personnels de la centrale.

Mes remerciements vont également au président et aux membres de jury qui feront l'honneur d'évaluer mon modeste travail. Ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Que toute personne qui d'une manière ou d'une autre, ma aidé et encouragé pour l'aboutissement de ce travail, trouve ici l'expression de ma gratitude.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Présentation de la SONALGAZ et de la centrale d'EL HAMMA II	
I.1. Présentation de la SONELGAZ.....	3
I.2. Présentation de la centrale d'EL HAMMA II.....	3
I.3. Organisation de la centrale du HAMMA II.....	4
Chapitre II : généralités sur les centrales électriques de production	
II.1. Généralités	7
II.2. Les centrales thermiques	8
II.2.1. Les centrales thermiques à flammes.....	9
II.2.2. Les centrales nucléaires	10
II.3. Les énergies renouvelables	13
II.3.1. Les centrales solaires	13
a) Le solaire photovoltaïque	13
b) Le solaire thermique	14
II.3.2. Les centrales éoliennes	15
II.3.3. Les centrales hydrauliques	17
Chapitre III : Généralités sur les turbines à gaz, les alternateurs et les systèmes d'excitations	
III.1. Les turbines à gaz	19
III.1.1. Généralités	19
III.1.2. Le principe de fonctionnement des turbines à gaz.....	19
III.2. Les alternateurs	21
III.2.1. Généralités	21

III.2.2. Constitution	22
a) L'inducteur	22
b) L'induit	24
III.2.3. Démarrage et arrêt	25
a) Contrôle avant le démarrage	25
b) Démarrage	26
c) Excitation à vide	26
d) Synchronisation	26
e) Chargement	27
f) Arrêt	28
III.3. Systèmes d'excitations	28
a) Excitation avec une machine à courant continu	28
b) Excitation par pont de diodes fixes	29
c) Excitation par pont de diodes tournantes	29
d) Excitation par pont de thyristors fixes	30
III.3.1. Les redresseurs commandés triphasés	30
III.3.2. composant utilisé	31
III.3.2.1. Présentation	31
III.3.2.2. Fonctionnement du composant parfait	31
a) Caractéristique et fonctionnement	31
b) Blocage par commutation naturelle	32
c) Blocage par commutation forcée	33
III.3.2.3. Composant réel	34
a) Caractéristique et limites de fonctionnement.....	34
b) Amorçage	35
c) Blocage	36
d) Analogie	36

III.3.3. Structure du redresseur triphasé commandé	
double alternance	38
III.3.4. Calcul de la valeur moyenne de tension de charge	39
III.3.5. Dimensionnement des thyristors	39
a) Contrainte en tension	39
b) Contrainte en courant	39
III.4. Principe de l'association	39

Chapitre IV : Etude et simulation de l'excitatrice statique de la centrale

d'EL HAMMA II

IV.1. Etude du convertisseur d'excitation	40
IV.1.1. Principe de fonctionnement du convertisseur	41
IV.1.2. Description du convertisseur d'excitation	42
IV.2. Simulation de l'excitatrice statique	44
IV.2.1. Schéma de simulation	45
IV.2.2. Représentation des différentes tensions et courants	
dans l'état sain du convertisseur	46
IV.2.3. Les causes pouvant provoqués une défaillance du thyristor ...	49
IV.2.4. Interprétation des courbes	56
IV.3. Protection des semi-conducteur	57
IV.3.1. Protection en courant	58
a) Protection contre les surcharges	59
b) Protection contre les di/dt	59
IV.3.2. Protection en tension	59
a) Surtension due à la commutation des thyristors	59
b) Surtension due à la fusion d'un fusible	60
IV.4. Conclusion	60

Conclusion générale	61
Annexe A	62
Annexe B	78
Bibliographie	

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, l'électronique de puissance est basée sur l'usage de composant de type semi-conducteur. Ces composants sont des interrupteurs électroniques qui s'amorcent et se bloquent soit par une électrode de commande, soit spontanément en fonction des grandeurs électriques extérieures. Associés dans un convertisseur statique, ils permettent le contrôle du transfert de puissance pouvant dépasser le MW. Aujourd'hui, les performances atteintes sont telles qu'un semi-conducteur formé par quelques centimètres carrés de silicium peut conduire des courants de plusieurs centaines à voir des milliers d'ampères et tenir des tensions dépassant le millier de volts. Malgré ces chiffres impressionnants, seulement 1% de l'énergie contrôlée par le convertisseur suffit à détruire ce composant. Le fonctionnement viable d'un convertisseur passe donc par une adéquation absolue entre les contraintes électriques du circuit de puissance et les limites physiques du semi-conducteur de puissance dans ce même circuit, à l'échelle de la microseconde.

Par ailleurs, l'électronique de puissance est devenue de plus en plus présente. Nous ne nous limitons pas à connecter de simples machines sur le réseau. Les charges sont de plus en plus souvent alimentées à travers des convertisseurs statiques. Ce qui est le cas du turboalternateur de la centrale de production d'El HAMMA II qui est alimenté à travers un pont de greïtz tous thyristors.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence d'une défaillance au niveau du système d'excitation statique du turboalternateur au sein de cette station en établissant une simulation sous environnement MATLAB.

Pour mener à bien notre travail, on l'a divisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnerons un aperçu sur la société de SONELGAZ et la centrale d'EL HAMMA II, objet de notre mémoire, ainsi que son organisation.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéresserons au principe de fonctionnement des divers types de centrales de production en passant par les centrales thermiques à flammes, les centrales thermiques nucléaires, les centrales solaires photovoltaïques, les centrales solaires thermiques, les centrales éoliennes sans oublier les centrales hydrauliques.

Le troisième chapitre sera consacré aux généralités sur les alternateurs, les turbines à gaz et les systèmes d'excitations.

Enfin, dans le quatrième chapitre nous présenterons l'étude et la simulation du convertisseur statique servant d'excitatrice de l'alternateur de la centrale d'El HAMMA II, ensuite nous conclurons.

Deux annexes illustrent le fonctionnement et la description du turboalternateur ANSALDO type 50THR-L45 et celui de la turbine à gaz ANSALDO type V94.3A de la centrale d'El HAMMA II.

Chapitre I

PRESENTATION DE LA SONELGAZ ET DE LA CENTRALE D'EL HAMMA II

I.1. Présentation de la société SONELGAZ

La Société Nationale SONELGAZ est le monopole de gestion de l'énergie électrique dans notre pays. Elle est née de l'ancienne Société Publique de l'Electricité et du Gaz d'Algérie en 1968.

Actuellement, la SONELGAZ assure la production, le transport, la distribution, l'engineering et des travaux de réalisation de certains projets d'électricité et de gaz sur le territoire national tout en visant à répondre de manière régularisée, sûre et permanente aux besoins réclamés par l'immense clientèle.

I.2. Présentation de la centrale d'El HAMMA II

La centrale, du présent projet, est installée sur un terrain situé dans le quartier résidentiel du HAMMA dans le centre d'Alger (Algérie), à 150m de la côte et en bordure de l'autoroute Est (voir la figure I.1). La centrale est équipée de deux groupes turbines à gaz dont la puissance totale nominale de base aux bornes usine est égale à 417.8MW. La centrale peut fonctionner avec plusieurs combustibles :

- Gaz naturel (principale) ;
- Gasoil (combustible de source).

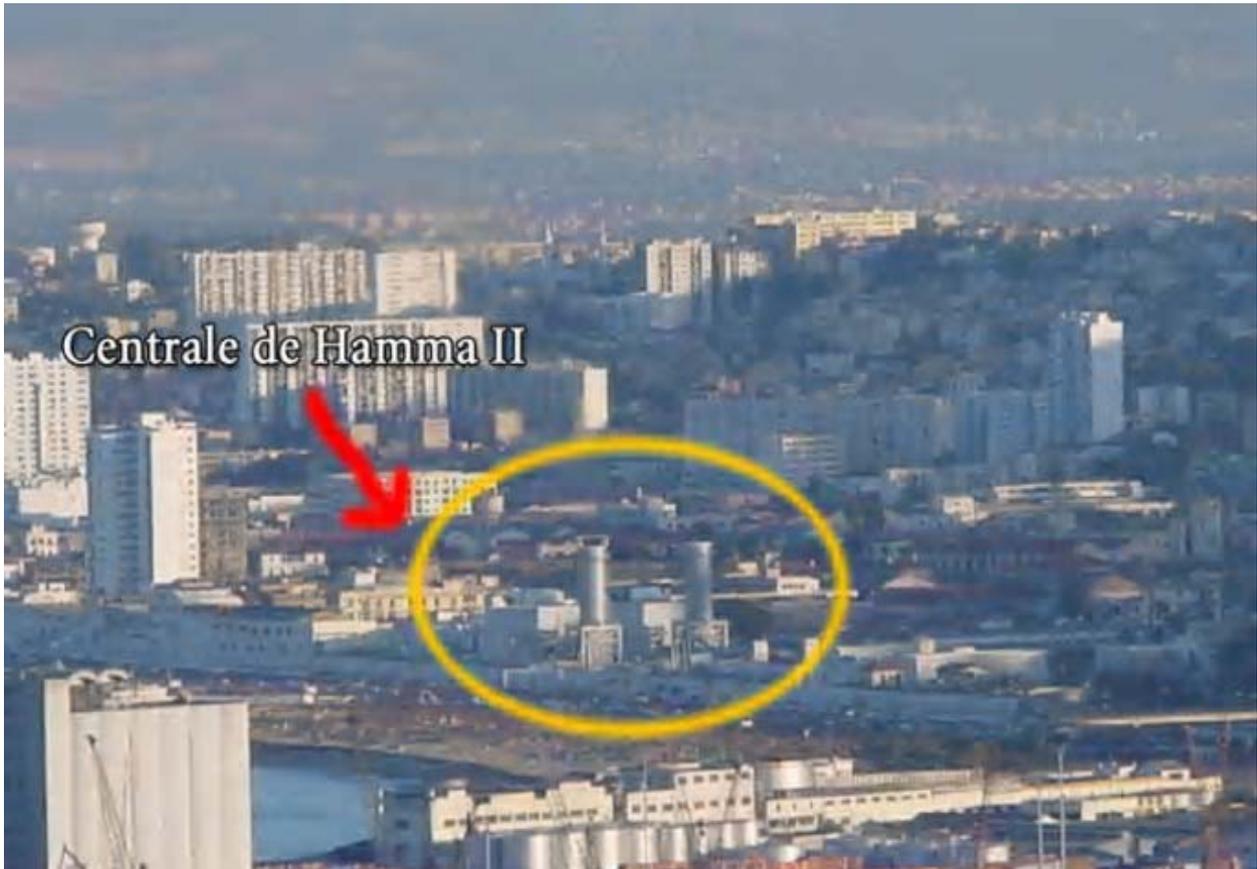


Figure I.1 : Localisation de la centrale d'El HAMMA II

La mission de la centrale est de satisfaire les programmes de production d'électricité établis par les mouvements d'énergie demandée et de fournir les prestations dans les meilleures conditions de qualité avec la continuité nécessaire. À cette fin, elle est sensée:

- Garantir la disponibilité des moyens de production mis à leur disposition et la conformité de service ;
- Assurer à leurs installations l'exploitation et l'entretien dans les meilleures conditions de coût ;
- Superviser et coordonner les activités d'exploitation et de maintenance ;
- Assurer la maîtrise des ouvrages vis-à-vis de l'engineering des moyens de production.

I.3. Organisation de la centrale du HAMMAII

Afin de gérer efficacement le bon fonctionnement de la centrale, cinq subdivisions sont créées (voir la figure I.2) :

a) Subdivision Electrique :

Contrôle, dirige et suit tout travail de domaine électrique, de régulation et automatique.

b) Subdivision Mécanique :

Chargée de l'analyse et du contrôle de l'exécution des travaux d'aspect mécanique.

c) S/ Exploitation :

Chargée essentiellement :

- D'augmenter et diminuer l'énergie produite en démarrant et en arrêtant les groupes selon les programmes établis par le mouvement d'énergie ;
- De la conduite, la surveillance des installations de production ainsi que de la transmission des informations à propos de leur fonctionnement aux services concernés ;
- Assurer la responsabilité de la centrale en dehors des heures de travail ;
- Prendre les mesures utiles en cas de défaillance ;
- Signaler les anomalies constatées et élaborer les demandes de travail ;
- Contrôler l'ensemble des paramètres de fonctionnement.

d) Subdivision Contrôle Economique :

Sa mission principale se résume à :

- Suivre les paramètres et améliorer les performances des équipements ;
- Faire les essais mensuels de la consommation spécifique et contrôler son évolution ;
- Proposer les mesures jugées utiles pour la bonne exploitation.

e) Subdivision Diagnostique Machine

Destinée à :

- Etablir les diagnostics du comportement vibratoire et thermique des machines tournantes ;
- Suivre les mesures et essais électriques des moteurs dans toutes les centrales du sous groupement ;
- Proposer des consignes d'exploitation et déclencher des opérations d'entretien.

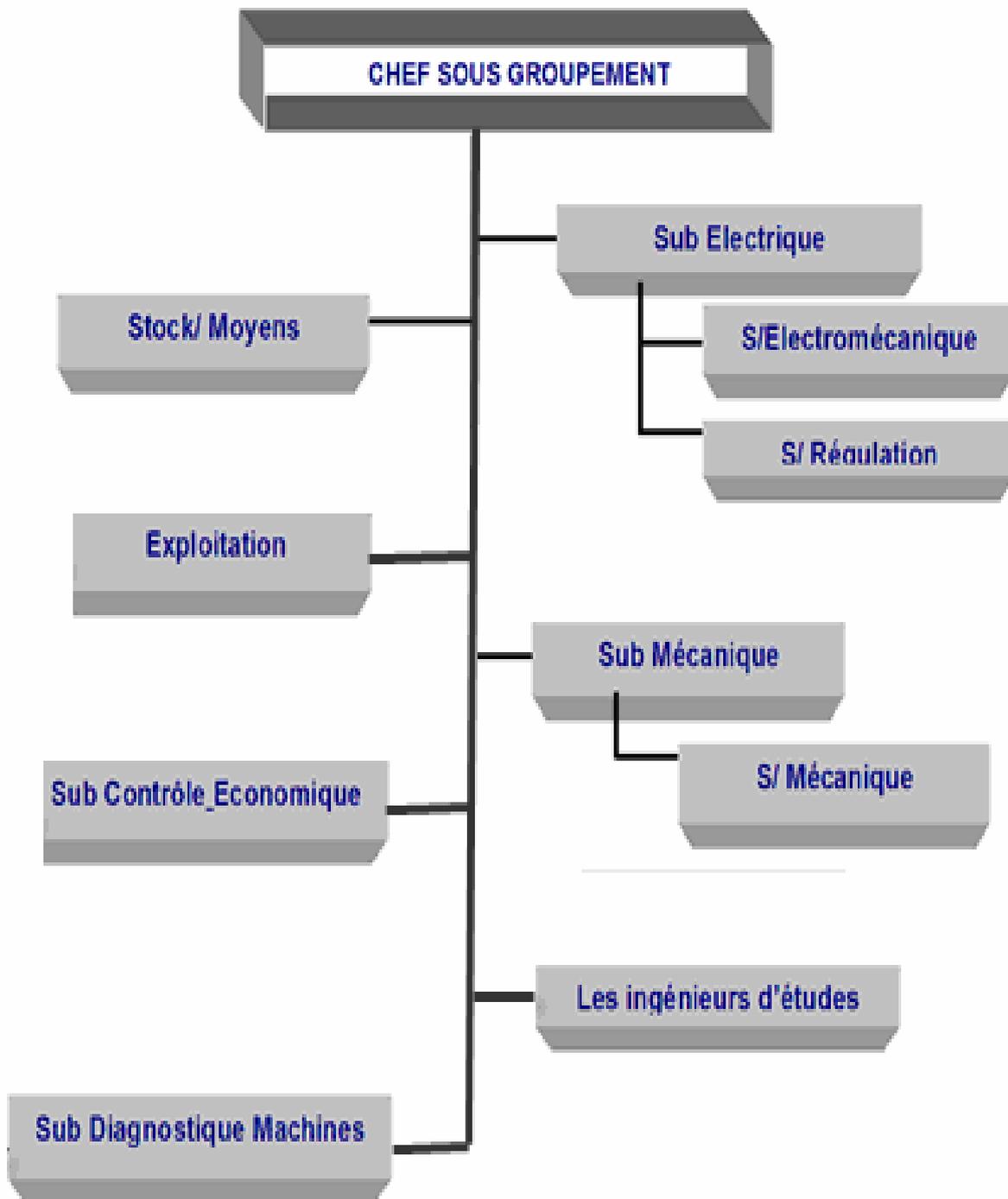


Figure I.2 : Organigramme des groupements de la centrale

Chapitre II

GENERALITES SUR LES CENTRALES ELECTRIQUES DE PRODUCTION

II.1. Généralités

Une centrale électrique (de production d'énergie) est un site industriel qui produit de l'électricité en grande quantité. Les centrales électriques transforment des sources naturelles en énergie électrique, afin d'alimenter en électricité des consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. Le réseau électrique est utilisé pour transporter/distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs.

Mais qu'est ce que l'énergie ?

L'énergie est la quantité de travail qu'un système peut effectuer, ou la quantité de chaleur qu'il peut transférer. Il y a travail lorsqu'un objet ou une substance est déplacé. On a besoin d'énergie pour chauffer de l'eau ou pour brûler des bougies. La chaleur transférée d'un objet ou d'une substance chaude à une substance froide lorsqu'ils sont en contact est aussi de l'énergie, [38].

L'énergie se présente sous beaucoup de formes différentes, telles que la lumière, la chaleur, l'énergie chimique (stockés dans les liaisons chimiques) et l'énergie mécanique (que l'on trouve dans la matière en déplacement comme par exemple : l'eau qui s'écoule). Toutes les formes d'énergie sont réparties en deux groupes principaux. Le premier type d'énergie est l'énergie cinétique des atomes, ions et molécules. Quand ces composés chimiques sont en mouvement du fait de l'énergie cinétique, ils se réchauffent. On ne peut pas toujours détecter la chaleur due à l'énergie cinétique car, quelquefois, la chaleur d'une substance peut augmenter sans que la température augmente. Le deuxième type d'énergie est l'énergie potentielle, une énergie qui est stockée et potentiellement disponible pour l'utilisation. Avant que l'énergie potentielle ne puisse être utilisée, elle est transformée en énergie cinétique ; par exemple : un dé tenu dans une main contient simplement de l'énergie potentielle, quand on le lance l'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique et il y a mouvement.

Cette variété de forme d'énergie a donné naissance à différentes centrales, toutes sont basées sur le même principe : faire tourner une turbine couplée à un alternateur qui produira de l'électricité (sauf pour les centrales photovoltaïques où il n'y a pas de turbine). La différence de fonctionnement se situe au niveau de l'entraînement de la turbine. Dans les centrales hydrauliques, l'eau des barrages actionne la turbine. Dans les centrales thermiques classiques, un combustible fossile (charbon, gaz naturel ou pétrole) est brûlé pour entraîner la turbine ou bien il est brûlé pour transformer l'eau en vapeur capable d'entraîner la turbine. Dans les centrales nucléaires, les noyaux d'uranium remplacent le combustible fossile. En se cassant, ces gros noyaux libèrent de l'énergie nucléaire, qui sera utilisée pour produire de la vapeur d'eau laquelle, de la même manière que dans les centrales thermiques, peut activer la turbine, [37].

II.2. Les centrales thermiques

Une centrale thermique produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur. Cette source peut être un combustible brûlé (gaz naturel, certaines huiles minérales, charbon, déchets industriels, déchets ménagers, etc.), la fission de noyaux d'uranium 235 ou de plutonium 239, ou encore de la chaleur préexistante (noyau de la Terre pour la géothermie, Soleil etc.). La source chauffe un fluide (souvent de l'eau) qui passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur). Cette vapeur entraîne une turbine couplée à un alternateur qui transforme l'énergie cinétique de la turbine en énergie électrique, [15].

Pour entraîner la turbine, il faut que la pression soit plus faible à la sortie de celle-ci, qu'à l'entrée. Ceci est obtenu en condensant la vapeur, en aval de la turbine, à l'aide d'une source froide. Il faut toujours une source chaude et une froide, pour échanger un travail avec une machine thermique. Le fluide condensé est en général réutilisé comme source de vapeur et effectue alors un cycle thermodynamique. Lorsqu'on utilise la chaleur dégagée au niveau de la source froide, on fait de la cogénération, [26].

Il existe différents types de centrale thermique : centrale nucléaire, centrale thermique à flamme (charbon, fioul ou gaz)....

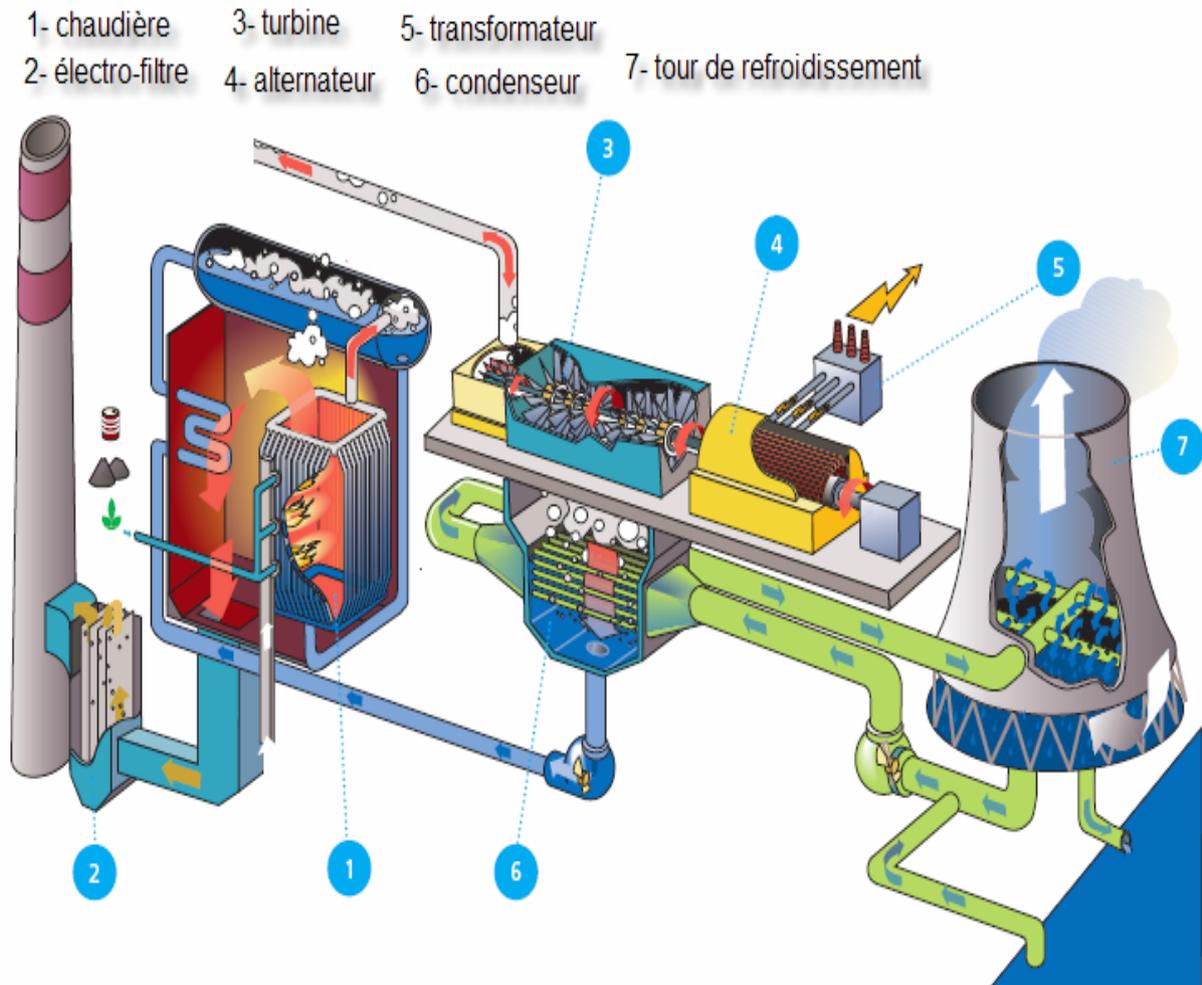
II.2.1. Les centrales thermiques à flammes

Une centrale thermique classique fonctionne grâce à la combustion de gaz naturel, de charbon (charbon pulvérisé) ou de fuel dans une chaudière à vapeur (voir la figure **II.1**). La chaleur des gaz de fumées et des flammes sert à chauffer la tuyauterie de la chaudière et transforme progressivement l'eau qui y circule en vapeur. Les gaz de fumées s'échappent par la cheminée. Dans les centrales au charbon, un électro-filtre en retient d'abord les particules de poussière. La vapeur fait tourner la turbine à vapeur, qui à son tour entraîne l'alternateur pour produire l'électricité. Le transformateur élève la tension produite, avant qu'elle ne soit injectée dans le réseau. Après son passage dans la turbine où elle libère son énergie, la vapeur se condense et retourne sous forme d'eau vers la chaudière. Dans le condenseur, la vapeur glisse sur des milliers de tubulures remplies d'eau froide pompée des eaux de surface (eau de refroidissement) et lui cède sa chaleur.

La chaleur des centrales refroidissent cette eau, devenue relativement chaude, dans une tour de refroidissement, pour ensuite la réutiliser. Dans ces immenses tours de refroidissement, l'eau entre en contact avec un courant d'air ascendant créé par le tirage naturel (effet de cheminée de la tour de refroidissement). Lorsque des ventilateurs créent ce flux d'air, la tour de refroidissement est plus petite. L'eau se refroidit et retombe sous forme de gouttelettes dans la tour de refroidissement. L'air réchauffé, saturé de vapeur d'eau, s'échappe de la tour de refroidissement en un nuage de vapeur blanc. Une grande partie de l'eau de refroidissement est repompée vers le condenseur et réutilisée. Seul 1 à 1,5 % s'évapore.

Certaines centrales thermiques classiques ne disposent pas de tour de refroidissement et rejettent les eaux de refroidissement dans les eaux de surface. Le débit de celles-ci est dans ce cas suffisant pour limiter l'augmentation de température.

Une centrale thermique classique transforme 35 à 40 % de l'énergie du combustible en électricité. Elle fournit parfois aussi de la chaleur, sous forme de vapeur, à des entreprises,[26], [38].



**Figure II.1 : Schéma de production de l'électricité dans
une centrale thermique à flamme**

II.2.2. Les centrales nucléaires

Une centrale nucléaire est une usine de production d'électricité (voir la figure II.3). Elle utilise pour cela la chaleur libérée par l'uranium qui constitue le combustible nucléaire. L'objectif est de faire chauffer de l'eau afin d'obtenir de la vapeur. La pression de la vapeur permet de faire tourner à grande vitesse une turbine, laquelle entraîne un alternateur qui produit de l'électricité. Ce principe de fonctionnement est le même que celui qui est utilisé dans les centrales thermiques classiques fonctionnant avec du charbon, du pétrole ou du gaz... à cette différence que le combustible utilisé comme source de chaleur est constitué par

l'uranium. Le principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire peut être schématisé comme suit, [26], [34], [37] :

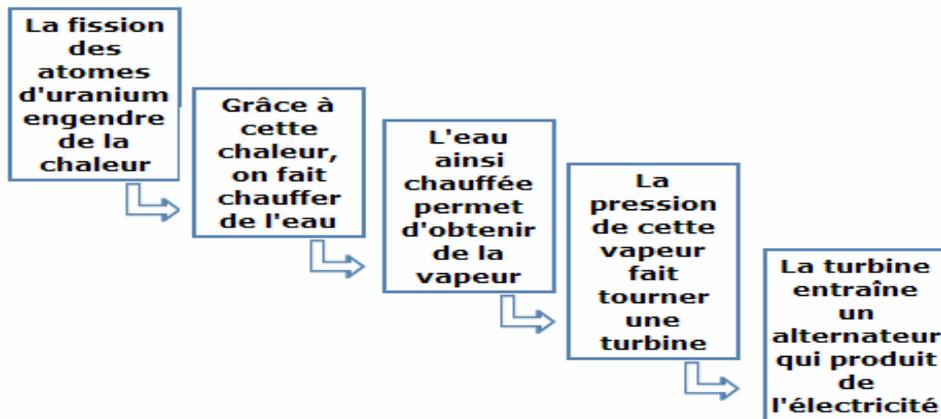


Figure II.2 : Schéma de principe de production d'électricité dans les centrales nucléaires

On peut résumer le mode de fonctionnement des centrales nucléaires comme ci-dessous ;

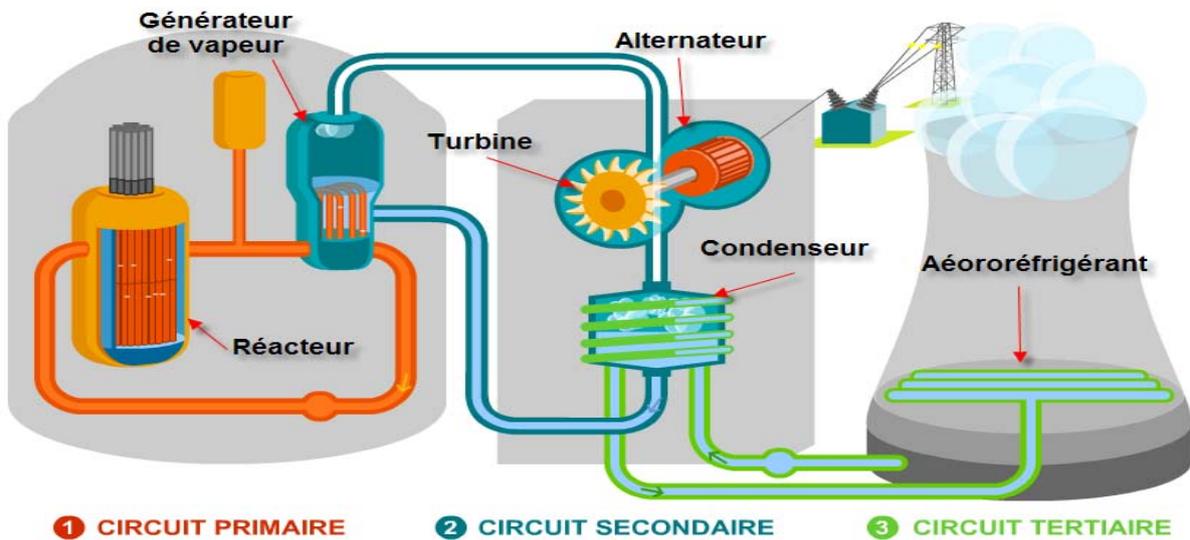


Figure II.3 : Schéma de fonctionnement d'un réacteur à eau sous pression (REP)

Dans les centrales nucléaires, la production d'électricité ainsi que le refroidissement et l'évacuation de la chaleur, s'effectuent selon le processus suivant :

➤ **Dans le circuit primaire**

L'uranium 235 est conditionné sous forme de petites pastilles. Celles-ci sont empilées dans des gaines métalliques étanches réunies en assemblages. Placés dans une cuve en acier remplie d'eau, ces assemblages forment le cœur du réacteur. Ils sont le siège de la réaction en chaîne, qui les porte à haute température. L'eau de la cuve s'échauffe à leur contact (plus de 300°C). Elle est maintenue sous pression, ce qui l'empêche de bouillir, et circule dans un circuit fermé appelé circuit primaire.

➤ **Dans le circuit secondaire**

L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé : le circuit secondaire. Cet échange de chaleur s'effectue par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Au contact des tubes parcourus par l'eau du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire s'échauffe à son tour et se transforme en vapeur. Cette vapeur fait tourner la turbine entraînant l'alternateur qui produit l'électricité. Après son passage dans la turbine, la vapeur est refroidie, retransformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle.

➤ **Dans le circuit de refroidissement**

Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est le but d'un troisième circuit indépendant des deux autres, le circuit de refroidissement. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine. Pour cela un condenseur est aménagé, appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée d'une source extérieure : rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense pour se transformer en eau. Quant à l'eau du condenseur, elle est rejetée, légèrement échauffée, à la source d'où elle provient. Si le débit de la rivière est trop faible, ou si l'on veut limiter son échauffement, on utilise des tours de refroidissement, ou aéroréfrigérants. L'eau échauffée provenant du condenseur, répartie à la base de la tour, est refroidie par le courant d'air qui monte dans la tour. L'essentiel de cette eau retourne vers le condenseur, une petite partie s'évapore dans l'atmosphère, ce qui provoque ces panaches blancs caractéristiques des centrales nucléaires.

II.3. Les énergies renouvelables

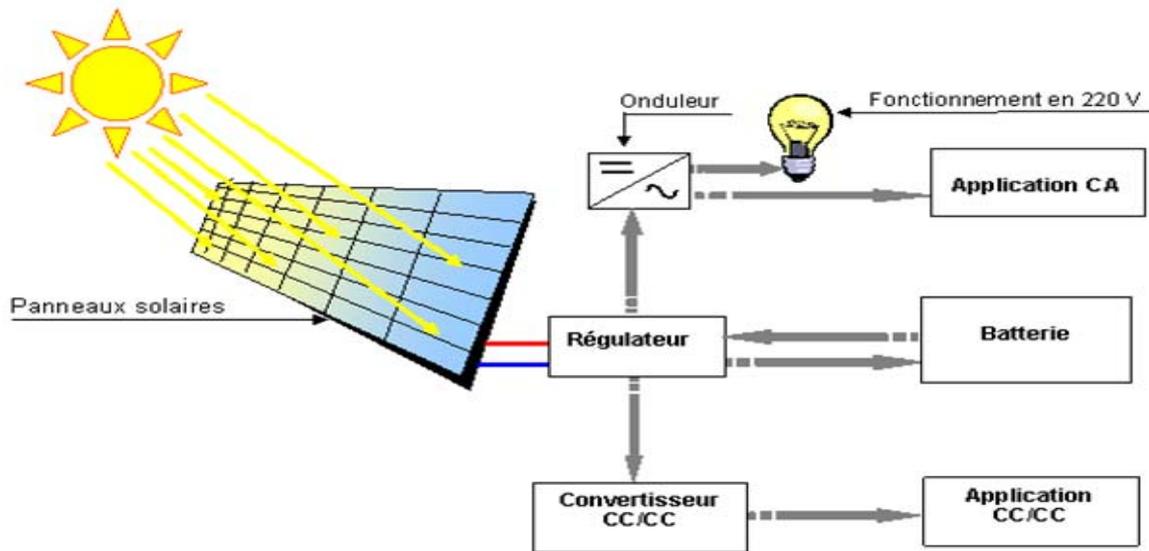
Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et non polluante et dont l'exploitation cause le moins de dégâts écologiques, parmi elles on peut citer l'ensoleillement, le vent, le mouvement de l'eau dans les cours d'eau ou les mers, les matières organiques et la chaleur des entrailles de la terre.

II.3.2. Les centrales solaires

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de la terre, est notre plus grande source d'énergie. C'est en effet à son rayonnement que l'on doit les autres énergies renouvelables. Le soleil est à l'origine du cycle de l'eau, l'échauffement de l'air et de l'eau crée les vents et les courants marins, alors que la lumière assure la croissance des plantes. Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées. On peut distinguer le solaire photovoltaïque et le solaire thermique,[26], [34], [37], [38].

a) Le solaire photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques appelées aussi photopiles transforment directement la lumière du soleil en électricité. Elles n'utilisent pas la chaleur du soleil mais l'énergie de ses photons. Une cellule est un petit générateur de courant continu qui débite une tension de moins d'un volt (voir la figure **II.4**). L'utilisation industrielle des cellules dans l'énergie photovoltaïque se fait sous la forme de panneaux, [37].



**Figure II.4 : Schéma de principe de la production d'électricité
des centrales photovoltaïques**

b) Le solaire thermique

Les centrales solaires thermiques permettent d'exploiter l'énergie solaire qui réside dans la chaleur des rayonnements solaires dans des installations de grande envergure afin de produire de l'électricité. Elle se compose d'un récepteur central entouré par des héliostats (voir la figure II.5). Les héliostats sont des miroirs mobiles, commandés par ordinateurs, suivant la course du soleil et réfléchissant les rayons de ce dernier sur un absorbeur situé dans le haut de la tour. Dans cet absorbeur un liquide caloporteur est réchauffé, ce liquide sert par la suite à produire de la vapeur, qui elle-même actionnera une turbine à vapeur produisant de l'électricité, [26], [37].

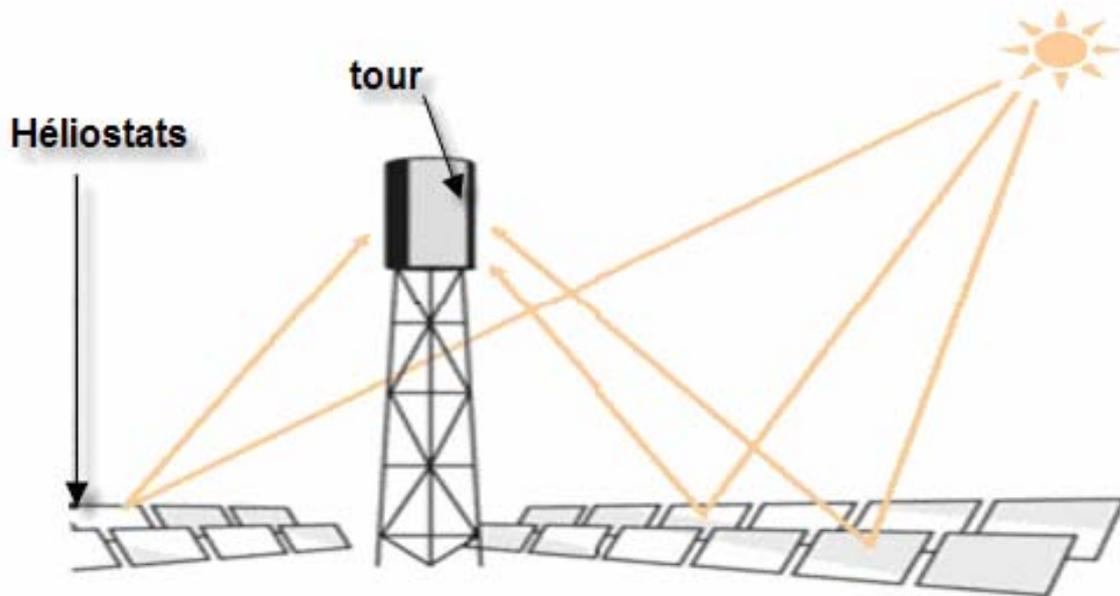


Figure II.5 : Principe de fonctionnement des centrales solaires thermiques

II.3.3. Les centrales éoliennes

Les éoliennes récupèrent l'énergie du vent pour la convertir en une force mécanique lorsqu'elles actionnent une pompe ou une meule, ou en électricité dans le cas des éoliennes modernes.

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité (voir la figure II.6). La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/min) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/min, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustant la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est accordée (50 Hz en général), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 V, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique. La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau, [34], [37], [38].

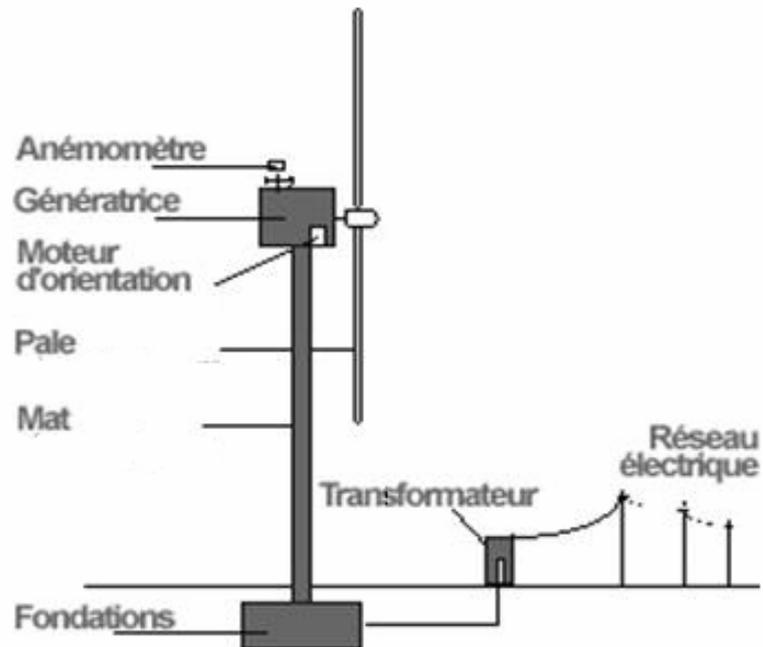


Figure II.6 : Principe de fonctionnement et de raccordement au réseau

L'électricité produite peut aussi être stockée dans des batteries (batteries de condensateurs) puis utilisée directement avec des appareils électriques spéciaux fonctionnant en courant continu ou bien transformée, via un onduleur (voir la figure II.7), en courant alternatif identique à celui délivré par le réseau.

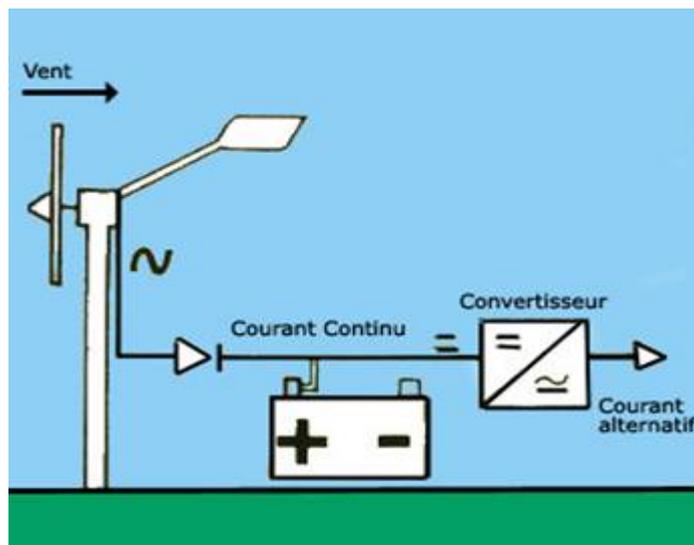


Figure II.7 : Principe de stockage d'électricité et de réutilisation

II.3.4. Les centrales hydrauliques

L'énergie hydraulique résulte du mouvement de masse d'eau coulant le long des pentes naturelles. Pour pouvoir transformer cette énergie en travail utile, il est nécessaire de la concentrer, soit en tirant parti des chutes naturelles, soit par l'aménagement d'un barrage de manière à obtenir une hauteur de chute et un débit suffisant pour installer une centrale (voir la figure II.8).

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau, par l'intermédiaire d'une roue entraînant un rotor d'alternateur. L'ensemble mécanique situé autour de la roue motrice s'appelle « la turbine ». Une turbine est un moteur rotatif entraîné par une veine d'eau qui transforme la plus grande partie de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, [26], [34], [37], [38].

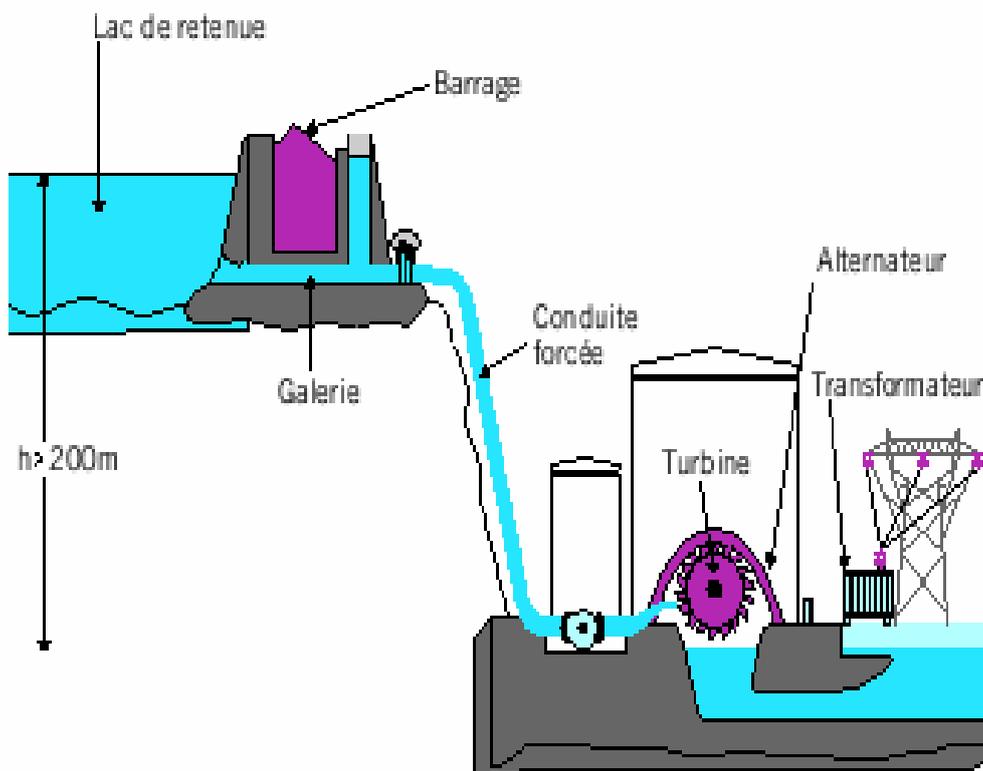


Figure II.8 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

Le fonctionnement d'une centrale hydraulique peut être résumé comme suite :

- Le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue ;
- Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir les vannes pour amorcer le cycle de production d'électricité. Suivant l'installation, l'eau s'engouffre alors dans une conduite forcée ou dans une galerie creusée dans la roche, et se dirige vers la centrale hydraulique située en contrebas ;
- A la sortie de la conduite forcée, la force de l'eau entraîne la rotation de la turbine ;
- La turbine entraîne l'alternateur qui produit de l'électricité ;
- Un transformateur élève alors la tension pour qu'elle puisse être transportée dans les lignes à haute et très haute tension ;
- L'eau turbinée rejoint la rivière par le canal de fuite.

Chapitre III

GENERALITES SUR LES TURBINES A GAZ, LES ALTERNATEURS ET LES SYSTEMES D'EXCITATIONS

III.1. Les turbines à gaz

III.1.1. Généralités

Une turbine à gaz, appelée aussi turbine à combustion, est une machine thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fuel, gaz...). La turbine à gaz est un moteur thermique réalisant les différentes phases de son cycle thermodynamique dans une succession d'organes traversés par un fluide moteur gazeux en écoulement continu, [34], [13].

Dans sa forme la plus simple, la turbine à gaz fonctionne selon le cycle dit de Joule comprenant successivement :

- Une compression adiabatique qui consomme de l'énergie mécanique ;
- Un chauffage isobare comme pour un moteur diesel ;
- Une détente adiabatique jusqu'à la pression ambiante qui produit de l'énergie mécanique ;
- Un refroidissement isobare, [22].

III.1.2. Le principe de fonctionnement des turbines

La turbine à gaz est essentiellement formée de trois parties principales (voir la figure III.1) :

- Le compresseur ;

**GENERALITES SUR LES TURBINES A GAZ, LES ALTERNATEURS
ET LES SYSTEMES D'EXCITATION**

- La chambre de combustion avec injecteurs relatifs ;
- La turbine.



Figure III.1 : Schéma d'un cycle de base d'une turbine à gaz

L'air froid aspiré de l'environnement extérieur au chantier, est comprimé et réchauffé en parallèle en traversant le compresseur. Pour réaliser cette phase il est nécessaire de consommer une certaine quantité d'énergie mécanique en soustrayant de l'énergie de l'élément turbine, transmise à travers le rotor (voir la figure **III.2**). Il est essentiel que le trajet du parcours du compresseur soit optimisé à obtenir une excellente efficacité globale sans pour autant trop consommer d'énergie. Comme compensation partielle de ce fait, l'énergie employée par le compresseur est ensuite transformée (pour le 99%) en énergie thermique (d'habitude le 1% rentre dans les consommations des pertes mécaniques), [2], [18], [23].

A l'intérieur des chambres de combustion, la réaction chimique entre l'air et le carburant produit une importante augmentation de la température à une pression relativement constante. En effet, la chute de pression entre l'évacuation du compresseur et l'admission à la turbine se trouve généralement comprise entre 2 et 2,5% de la pression initiale. Dans cette section le pouvoir calorifique du carburant est transformé en énergie thermique pour les gaz. Etant donné que le rapport de la masse entre l'air et le carburant est bien plus haut que le rapport stœchiométrique, la température finale des gaz ne sera point la température de la flamme (généralement entre 1700°C et 2100°C) mais uniquement fonction de la façon selon laquelle ils brûlent (pré-mélanges ou diffusion). En effet, l'air en excès est mélangé avec l'air de combustion et produit à l'intérieur de la turbine un mélange de gaz homogène dénommé « Température d'admission de la turbine », [12], [23].

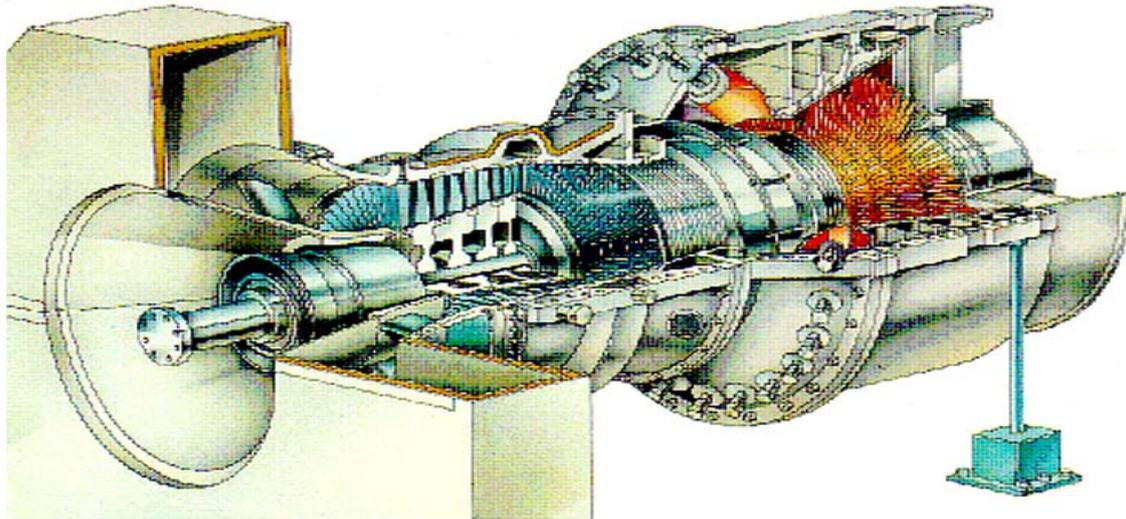


Figure III.2 : Une coupe longitudinale de la turbine V94.3A

Enfin, dans l'élément turbine, les gaz chauds se détendent jusqu'à atteindre la pression ambiante et leur température diminue en conséquence. Cette phase produit une grande quantité d'énergie mécanique, en partie requise par le compresseur, mais surtout reliée à un alternateur transformant l'énergie cinétique (rotation) en énergie électrique. L'énergie électrique à la sortie du générateur est acheminée vers le réseau à travers un disjoncteur groupe, un transformateur principal élévateur et un sectionneur de ligne, [20], [23].

III.2. Les alternateurs

III.2.1. Généralités

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. La machine synchrone est une machine très utilisée de par sa fonctionnalité et sa réversibilité. Elle est très utilisée dans la production d'énergie électrique et en traction. Pour de petites applications, on la retrouve de plus en plus à la place de moteur à courant continu. Elle porte le nom d'alternateur lorsqu'elle transforme de

l'énergie mécanique en énergie électrique. Lorsqu'elle fonctionne en moteur, on lui donne le nom de moteur synchrone. Avec le développement de l'électronique de puissance, le moteur synchrone vient remplacer le moteur à courant continu. De plus ne possédant pas de dispositif balais-collecteur, on dispose d'avantage de puissance, [3], [16], [19], [24].

III.2.2 Constitution

L'alternateur possède deux parties principales :

- L'inducteur porté le plus souvent par le rotor.
- L'induit port par le stator parcouru par des courants alternatifs.

a) L'inducteur

Le champ magnétique est créé par un aimant permanent ou par un électro-aimant alimenté par un courant continu J , appelé courant d'excitation. Si l'on fait tourner le rotor, les lignes de flux produites par les pôles inducteurs balayent les trois enroulements du stator et induisent dans ceux-ci des tensions triphasées, [11], [17], [24], [35].

Remarque : si J est constant, il crée un champ magnétique B constant, tournant à la fréquence de synchronisme $N_S = N$.

Les rotors sont à pôles saillants ou à pôles lisses selon qu'ils soient entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à haute vitesse par des turbines à vapeur.

➤ **Rotor à pôles saillants** : afin d'extraire la puissance maximale de la chute d'eau, les turbines hydrauliques des centrales à basse et à moyenne chutes d'eau tournent toujours à basse vitesse : entre 50 et 300 tr/min. comme les alternateurs sont raccordés directement aux turbines et puisqu'une fréquence de 50hz est imposée, on doit placer un grand nombre de pôles sur le rotor (voir la figure **III.3**). Les alternateurs à basse vitesse ont donc toujours un grand diamètre, de façon à donner l'espace nécessaire pour loger le nombre de pôles requis. dans ces machines, le rotor est constitué d'une roue en acier montée sur un arbre vertical et sur laquelle sont fixées les pièces polaires. Les bobinages d'excitation placés sur les pièces polaires sont constitués de barres de cuivre ordinairement nues, mais isolées entre elles par des bandes de mica. L'emploi de conducteurs nus favorise leur refroidissement. Les bobines sont reliées en série de façon que deux pôles voisins soient des polarités contraires. En plus de l'enroulement à courant continu, on installe une cage d'écureuil dans la

Chapitre III

GENERALITES SUR LES TURBINES A GAZ, LES ALTERNATEURS ET LES SYSTEMES D'EXCITATION

face des pôles. En régime permanent, cet enroulement ne porte aucun courant, car le rotor tourne à la vitesse synchrone. Lorsque la charge de l'alternateur change brusquement, il en résulte une oscillation mécanique du rotor de part et d'autre de la vitesse synchrone et un courant induit se met à circuler transitoirement dans la cage. Ce courant réagit avec le champ et amortit les oscillations du rotor, pour cette raison, cette cage d'écureuil est appelée enroulement amortisseur. Lorsque la charge triphasée n'est pas équilibrée, l'enroulement amortisseur tend également à combattre le déséquilibre des tensions induites dans le stator et à maintenir une forme d'onde sinusoïdale à ses bornes.

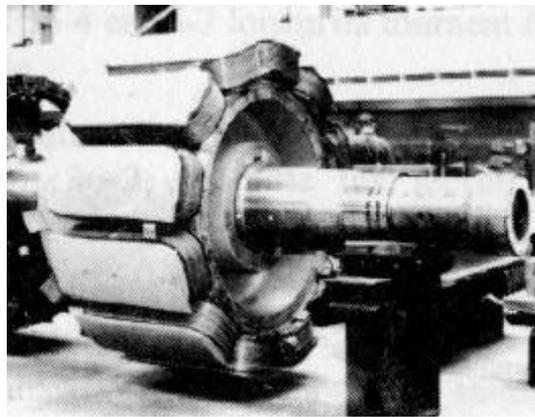


Figure III.3 : Rotor à pôles saillants

➤ **Rotor à pôles lisses** : les turbines à vapeur tournent toujours à haute vitesse 3000 ou 1500 tr/min sur 50 Hz. Par conséquent, les alternateurs qu'elles entraînent comportent deux ou quatre pôles seulement, on les désigne sous le nom de turbo-alternateurs. Leur rotor a une forme cylindrique, car les pôles sont formés en plaçant des bobines dans des encoches taillées dans la masse même du rotor (voir la figure **III.4**). Les forces centrifuges intenses dues à la haute vitesse de rotation imposent une limite au diamètre du rotor, comme, d'autre part, les grandes puissances (500 MW à 1500 MW) nécessitent un gros rotor, on est obligé de lui donner une forme très allongée.

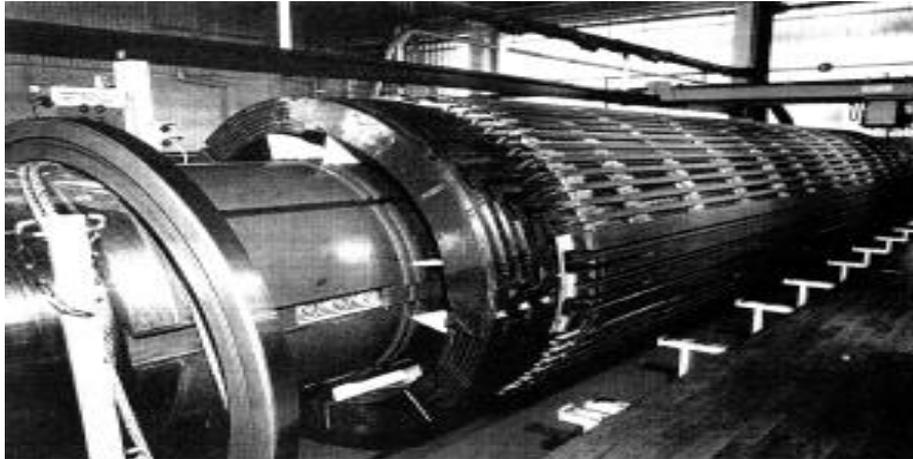


Figure III.4 : Rotor à pôles lisse

➤ **Rotor à aimant permanent** : Ce sont des machines qui peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement (voir la figure III.5). Associés à des variateurs de vitesse électronique, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine capacité et une accélération rapide (immeuble de grande hauteur par exemple).



Figure III.5 : Rotor à aimant permanent

b) L'induit

Du point de vue électrique, le stator d'un alternateur est identique à celui d'un moteur asynchrone triphasé. Il se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement

**GENERALITES SUR LES TURBINES A GAZ, LES ALTERNATEURS
ET LES SYSTEMES D'EXCITATION**

triphase. L'enroulement est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. On préfère la connexion en étoile à celle en triangle pour les raisons suivantes, [11], [17], [24], [35] :

➤ La tension par phase étant seulement $1/\sqrt{3}$, ou 58% de celle entre les lignes, on peut réduire l'épaisseur de l'isolant dans les encoches. Cela permet de grossir la section des conducteurs et, par conséquent, la puissance de la machine ;

➤ Lorsque l'alternateur est en charge, la tension induite par phase se déforme de sorte que la forme d'onde n'est plus tout à fait sinusoïdale. Cette distorsion est due principalement à la présence des tensions de troisième harmonique qui se superposent à la tension fondamentale. Avec une connexion en étoile, les troisièmes harmoniques n'apparaissent pas entre les fils de ligne, car elles s'annulent. Par contre, si l'on utilise une connexion en triangle, ces tensions s'additionnent et provoquent la circulation d'un courant dans le triangle et, par conséquent, occasionnent des pertes Joules supplémentaires. La tension nominale (entre ligne) d'un alternateur varie selon sa puissance en KVA. En général, plus la capacité de la machine est grande, plus sa tension est élevée. Cependant, la tension nominale d'un alternateur dépasse rarement 25 KV, car autrement le volume de l'isolation des conducteurs dans les encoches deviendrait prohibitif.

III.2.3. Démarrage et arrêt**a) Contrôle avant le démarrage**

Si l'alternateur a été précédemment arrêté après son travail normal pour une période de temps ne dépassant pas les quelques mois, dans ces conditions il faut, [11], [23], [24] :

➤ S'assurer du service correct du système de graissage des paliers, en contrôlant tout particulièrement la pression, la circulation, la température et le niveau de l'huile de graissage dans les paliers et dans les supports ;

➤ S'assurer que le système d'excitation est sous tension ;

➤ S'assurer que la protection, la surveillance et le contrôle à distance ainsi que les systèmes de mesure sont en exercice et prêts à se déclencher ;

➤ S'assurer de la fonctionnalité correcte du système de ventilation de démarrage et d'excitation.

b) Démarrage

Le démarrage devrait se faire à vide, c'est-à-dire, sans charge électrique extérieure raccordée à l'alternateur. Pendant le démarrage un contrôle doit être fait, [23], [24].

➤ La température des paliers de l'alternateur ainsi que la pression, température de l'huile de graissage pour les paliers, demeure entre des limites bien déterminées. En cas d'irrégularités dans la température des paliers ou des pannes du système de graissage, le démarrage (ou la marche) sera immédiatement arrêté pour permettre l'identification et l'élimination de la cause de la panne, avec une possible inspection des paliers et des tests fonctionnels sur les systèmes de graissage ;

➤ Les vibrations mécaniques des paliers ne doivent pas excéder des limites bien déterminées de l'alternateur. En cas de vibrations mécaniques excessives, il est conseillé d'interrompre le démarrage (ou la marche) en identifiant et en éliminant les causes avant de faire redémarrer l'alternateur ;

➤ Le bruit de l'alternateur ainsi que celui de ses parties doit être tout à fait normal ;

➤ Le démarrage se termine lorsque la vitesse atteinte avoisine la vitesse nominale.

c) Excitation à vide

L'excitation de l'alternateur se développe graduellement après avoir atteint une vitesse très proche de la valeur nominale, [23], [24].

Lors de l'excitation à vide il est nécessaire de veiller à ce que :

➤ La tension de l'alternateur (tension /fréquence relative) ne doit pas excéder le taux de la valeur nominale ;

➤ La tension à vide ne doit jamais excéder (sauf en cas de brèves périodes de temps) la valeur maximale de la tension nominale.

d) Synchronisation

Pour brancher l'alternateur sur le réseau ou le coupler avec un autre alternateur, il faut respecter les conditions suivantes :

GENERALITES SUR LES TURBINES A GAZ, LES ALTERNATEURS ET LES SYSTEMES D'EXCITATION

- La tension de l'alternateur doit être égale à celle du réseau ;
- La fréquence de l'alternateur doit être la même que celle du réseau ;
- La tension de l'alternateur doit être en phase avec celle du réseau ;
- La séquence des phases de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.

En agissant sur le régulateur de vitesse de la turbine, on amène tout d'abord l'alternateur à une vitesse voisine de celle du synchronisme, afin que sa fréquence soit proche de celle du réseau. On règle ensuite l'excitation de façon que la tension induite soit égale à celle du réseau, [3], [11].

On observe que les tensions ont la même fréquence et la même phase au moyen d'un synchronoscope. Suivant le sens de rotation de l'aiguille de cet instrument, on ralentit ou on accélère la machine jusqu'à ce que l'aiguille tourne très lentement. Enfin, au moment où l'aiguille passe devant le point neutre du synchronoscope, les tensions sont en phase, on ferme alors l'interrupteur qui réalise le couplage de l'alternateur avec le réseau.

Dans la centrale, la synchronisation se fait automatiquement au moment précis où les conditions énumérées précédemment sont respectées.

e) Chargement

Après la synchronisation, les deux composantes de la charge électrique (puissance active et puissance réactive) peuvent être ajustées.

- La puissance active est réglée sur la force motrice (turbine à gaz).
- La puissance réactive est réglée en maniant l'excitation, c'est-à-dire le régulateur de tension.

Au cours de l'exercice de chargement, en plus de ce qui a déjà été mentionné à propos du démarrage, on doit vérifier que :

- La température de l'air de refroidissement tombe dans les limites recommandées ;
- Les surcharges de température sur les bobinages du rotor et du stator se maintiennent dans les limites consenties par rapport à l'air de refroidissement, [23], [24].

f) Arrêt

Pour arrêter l'alternateur, il faut :

- Réduire graduellement la puissance active en agissant sur la force motrice et la puissance réactive en agissant sur l'excitation ;
- Ouvrir le disjoncteur groupe et donner l'ordre d'arrêt pour le système de l'excitation et de la régulation de la turbine.

L'alternateur peut être arrêté par un dispositif automatique déclenché par le système de protection de l'installation ou par l'opérateur (arrêt de secours). Dans ce cas la charge est coupée à l'improviste causant de la sur vitesse et du survoltage à l'alternateur. Lesquels seront maintenus entre des limites bien déterminées et seront considérés comme transitoires, [23], [24].

III.3. Système d'excitation

Comme il a été mentionné au début de ce chapitre, le rotor de la machine synchrone doit être alimenté par un courant continu. Pour ce faire, il existe plusieurs types d'excitation.

a) Excitation avec une machine à courant continu

La machine à courant continu a été longtemps la seule machine pouvant fournir le courant continu d'excitation. Elle est encore très employée.

Jusqu'à des puissances importantes, elle est entraînée par l'arbre de l'alternateur, soit directement, souvent placée en porte à faux en bout d'arbre, soit par l'intermédiaire d'un engrenage ce qui permet de choisir la vitesse la plus favorable pour la machine.

Au plus simple, l'excitatrice est une génératrice shunt et le réglage se fait en agissant sur l'excitation de l'excitatrice par l'intermédiaire d'un rhéostat, [17], [23], [31].

Mais une difficulté se présente, nous savons que le l'excitation de l'alternateur doit varier dans de larges limites, donc aussi la tension aux bornes de la machine excitatrice. Or nous savons que la génératrice shunt ne se prête qu'à un réglage restreint, son circuit magnétique devant être légèrement saturé dès la tension la plus basse.

Une première solution consiste à donner au circuit magnétique une amorce de saturation dès les faibles valeurs du flux en pratiquant un étranglement dans les noyaux polaires ce qui modifie la caractéristique à vide.

Une autre solution est une deuxième excitatrice shunt dite excitatrice pilote fonctionnant à tension constante et fournissant le courant d'excitation de l'excitatrice principale par l'intermédiaire d'un rhéostat. L'excitatrice principale n'est pas saturée. Elle fonctionne en donnant par son induit un courant d'excitation de l'alternateur K fois plus grand que son propre courant d'excitation. On dit qu'elle fonctionne en amplificatrice, K est de l'ordre des dizaines.

b) Excitation par pont de diodes fixes

Le redresseur à diodes est monté en armoire et le courant continu est amené au rotor de l'alternateur par un collecteur à bagues. Le réglage de l'excitation est fait sur l'inducteur de l'excitateur. Il est souvent assuré par un alternateur, à tension fixe, à aimants permanents ou à auto-excitation débitant sur un pont de thyristors contrôlés par le régulateur et alimentant l'inducteur de l'excitateur, [17], [21], [24].

c) Excitation par pont de diodes tournantes

Pour les fortes puissances, la fourniture d'un courant élevé par les balais et les bagues est difficile à réaliser. Il est possible d'améliorer le dispositif d'excitation en utilisant le dispositif de la figure ci-dessous :

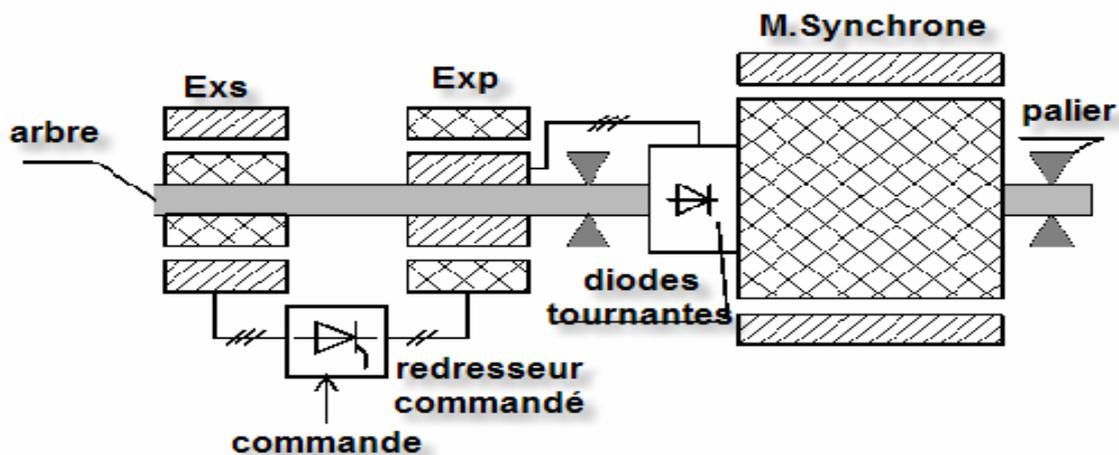


Figure III.6 : schéma de fonctionnement de l'excitation par pont de diodes tournantes

Remarque : Les induits des machines sont représentés en hachuré et les inducteurs en quadrillé.

L'excitatrice secondaire (Exs) est un alternateur triphasé excité par des aimants permanents au rotor. L'excitatrice principale (Exp) est un autre alternateur triphasé dont le stator est l'inducteur. Son excitation est réglée par le redresseur à thyristors placé entre (Exs) et (Exp). L'induit de (Exp) alimente un redresseur à diodes solidaires du rotor de la machine synchrone, d'où le nom de diodes tournantes donné à ce redresseur. Ce dispositif permet d'éviter l'utilisation de bagues et de balais, [17], [24].



Figure III.7 : plateau de diode incorporé sur la roue polaire de l'alternateur

d) Excitation par pont de thyristors fixes

Dans cette solution, peu fréquente et plus coûteuse, l'excitateur fonctionne à tension constante et est dimensionné pour les caractéristiques de plafond. Son induit débite sur un pont de thyristors contrôlés par le régulateur de tension. Le courant continu est amené au rotor de l'alternateur par un collecteur à bagues. Ce schéma réunit toutes les qualités de sécurité d'alimentation et de hautes performances, [24].

III.3.1. Les redresseurs commandés triphasés

Un montage redresseur commandé permet d'obtenir une tension continue (de valeur moyenne non nulle) à partir d'une tension alternative sinusoïdale (de valeur moyenne nulle).

L'utilisation de commutateurs commandables tels que les thyristors permet de réaliser des redresseurs dont la tension de sortie peut varier en fonction de l'angle d'amorçage α .

Il existe de nombreuses applications industrielles mettant en œuvre ce type de redressement, [39] :

- Variateur de vitesse de moteur à courant continu ;
- Commande de puissance (chauffage,...) ;
- Etc.

III.3.2. Composant utilisé

III.3.2.1. Présentation

Le thyristor est un composant commandé à la fermeture, mais pas à l'ouverture (voir la figure III.7). Il est réversible en tension et supporte des tensions V_{ak} aussi bien positives que négatives. Il n'est pas réversible en courant et ne permet que des courants i_{ak} positifs, c'est-à-dire, dans le sens anode-cathode, à l'état passant, [7], [9], [32].

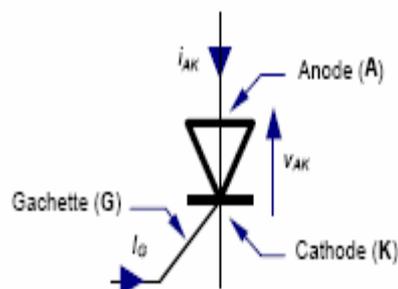


Figure III.7 : Symbole du thyristor

III.3.2.2. Fonctionnement du composant parfait

a) Caractéristique et fonctionnement

Le composant est bloqué (OFF) si le courant i_{ak} est nul (quelque soit la tension V_{ak}). Si la tension V_{ak} est positive, le thyristor est amorçable (voir la figure III.8). L'amorçage (A) est obtenu par un courant de gâchette i_G positif d'amplitude suffisante alors que la tension V_{ak} est positive, [25], [32].

L'état passant (ON) est caractérisé par une tension V_{ak} nulle et un courant i_{ak} positif.

Le blocage (B) apparaît dès l'annulation du courant i_{ak} . On ne peut pas commander ce changement, mais on en distingue deux types :

- La commutation naturelle : par annulation du courant i_{ak} ;
- Commutation forcée : par inversion de la tension V_{ak} .

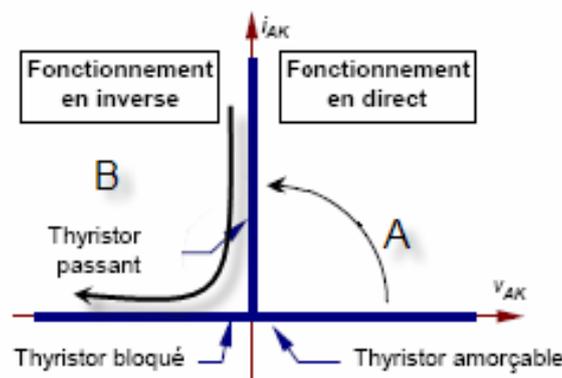


Figure III.8 : Caractéristique du thyristor

On peut remarquer que le thyristor, à la différence de la diode, a une caractéristique à trois segments, c'est-à-dire qu'une des grandeurs est bidirectionnelle (ici c'est la tension).

b) Blocage par commutation naturelle

Ce blocage intervient par extinction naturelle du courant anode-cathode. Le montage de la figure III.9 fournit un exemple de commutation naturelle qui se traduit par les chronogrammes de la figure III.10, [5], [8], [32].

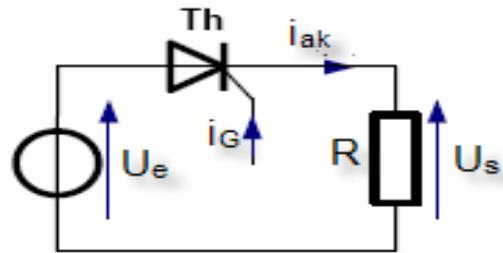


Figure III.9 : Montage de commutation naturelle

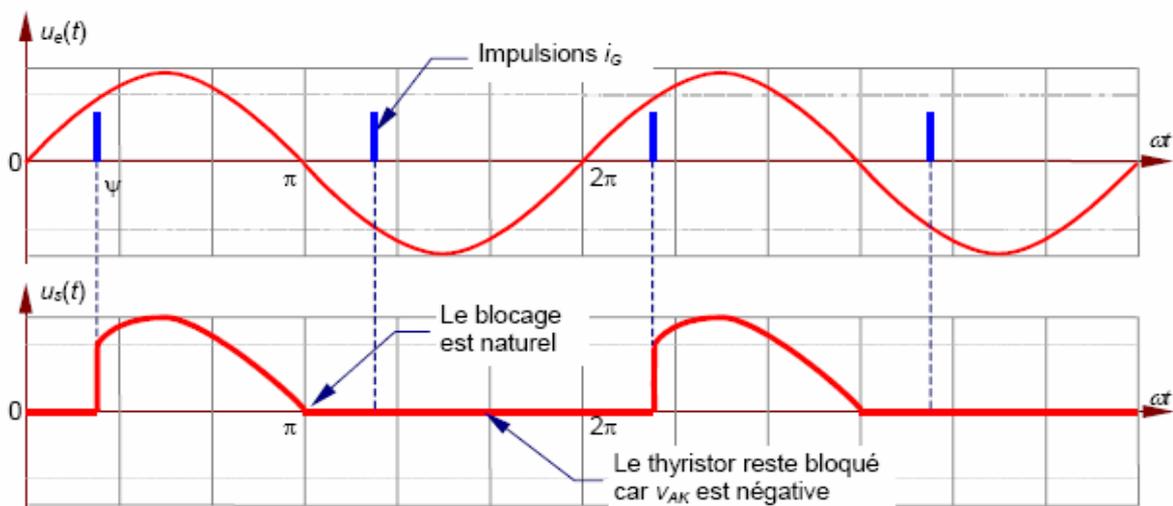


Figure III.10 : Chronogrammes illustrant une commutation naturelle

c) Blocage par commutation forcée

Ce blocage est imposé par la mise en conduction d'un autre composant (voir la figure III.11), qui applique une tension négative aux bornes du thyristor, provoquant donc son extinction.

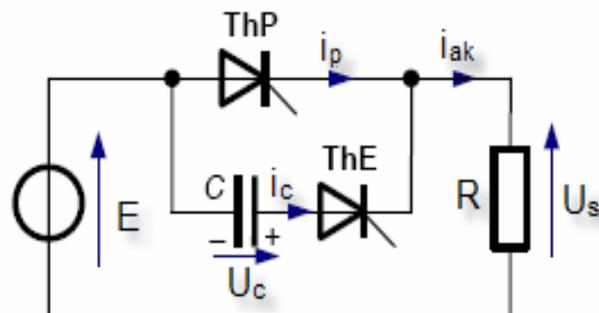


Figure III.11 : Montage avec circuit d'extinction

Les deux thyristors sont initialement bloqués. Dès que ThP est amorcé, il conduit et assure le courant i_p dans la charge (voir les chronogrammes de la figure III.12). Dès l'amorçage de ThE, la tension $V_{ak} = -U_c$ est donc négative et bloque ThP.

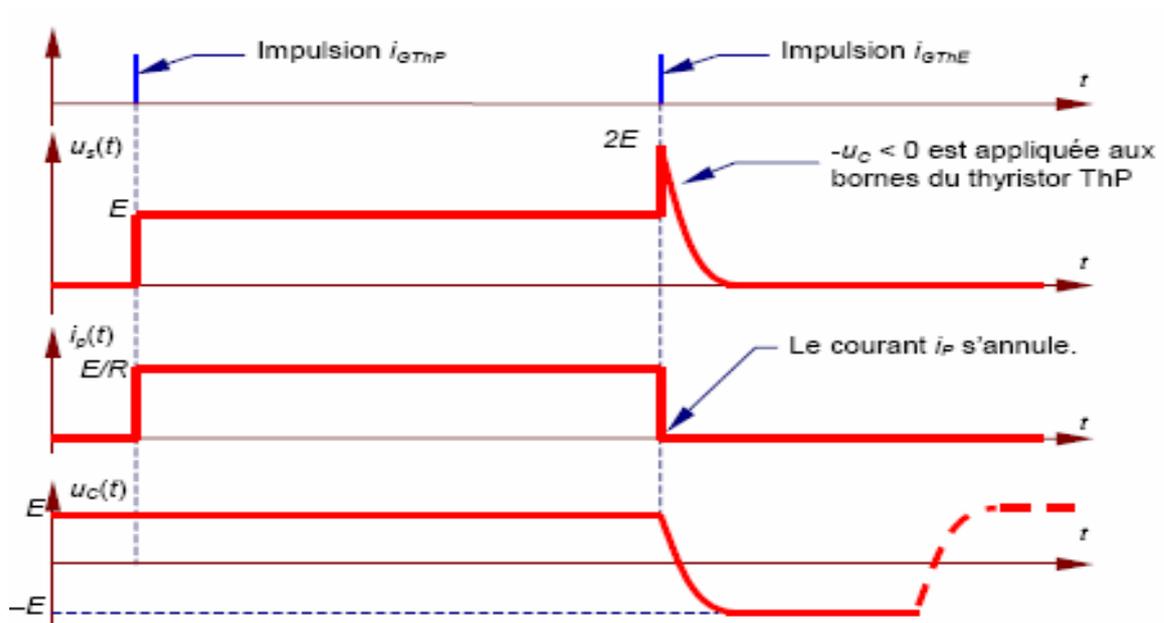


Figure III.12 : Chronogrammes issus d'une commutation forcée

III.3.2.3. Composant réel

a) Caractéristiques et limites de fonctionnement

Le fonctionnement réel est, comme pour une diode, caractérisé par ses deux états (voir la figure III.13).

- A l'état passant, $V_{ak} \approx 0$, le courant direct est limité par le courant direct maximal ;
- A l'état bloqué, $i_{ak} \approx 0$, la tension inverse est limitée (phénomène de claquage par avalanche) par la tension inverse maximale.

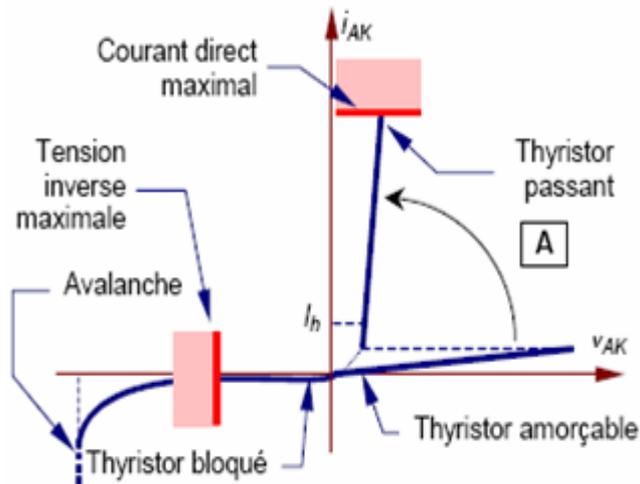
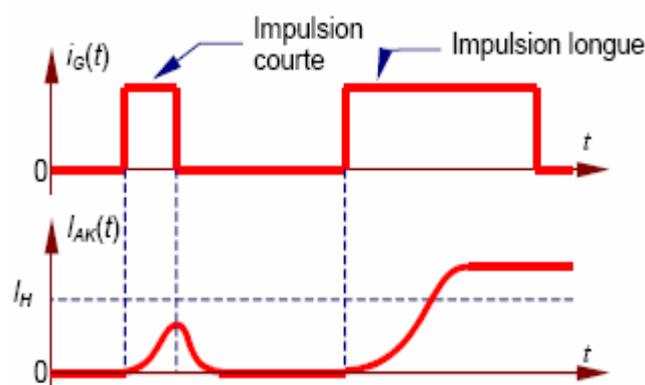


Figure III.13 : Caractéristique du thyristor réel

b) Amorçage

Pour assurer l'amorçage du composant, l'impulsion de gâchette doit se maintenir tant que le courant d'anode n'a pas atteint le courant de maintien (voir la figure III.14). La largeur de l'impulsion de gâchette dépend donc du type de charge alimentée par le thyristor. Sa durée sera d'autant plus importante que la charge sera inductive, [27], [32].

Figure III.14 : Evolution du courant i_{ak} à l'amorçage

c) Blocage

Après annulation du courant i_{ak} la tension V_{ak} doit devenir négative pendant un temps au moins égal au temps d'application de tension inverse t_q ($t_q > 100 \mu s$) (voir la figure III.15).

Si ce temps n'est pas respecté, le thyristor risque de se réamorçage spontanément dès que V_{ak} tend à redevenir positive, même durant un court instant, [27], [32].

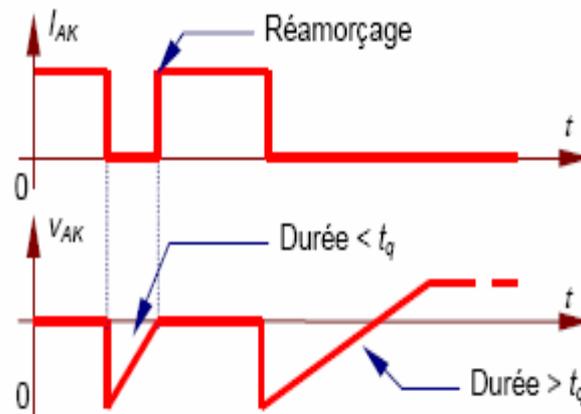


Figure III.15 : Evolution du courant i_{ak} au blocage

d) Analogie

Le fonctionnement du thyristor peut être décrit de façon simplifiée par une analogie hydraulique. Dans le dispositif représenté par la figure III.16, la pression est l'analogie de la tension anode-cathode V_{ak} , le débit l'analogie de l'intensité i_{ak} et le verrou celui de la gâchette.

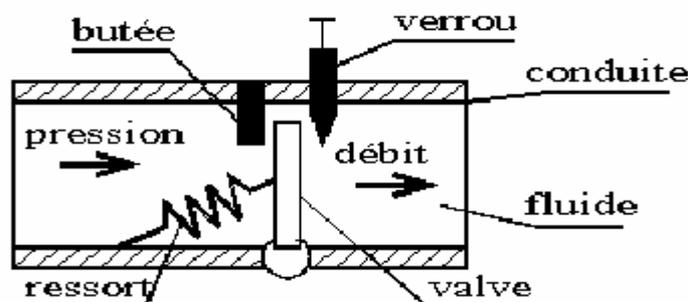
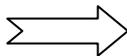
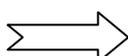
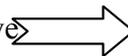
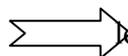


Figure III.16 : dispositif hydraulique

GENERALITES SUR LES TURBINES A GAZ, LES ALTERNATEURS
ET LES SYSTEMES D'EXCITATION

- Lorsque la pression est négative, elle appuie sur la valve contre la butée et aucun débit n'est possible, le verrou n'a aucune action sur le fonctionnement  Pour une polarisation $V_{ak} < 0$, le thyristor est alors bloqué et aucun courant i_{ak} ne peut circuler. Si la pression devient trop forte, la butée peut se casser et la valve sera détruite, laissant passer le fluide de droite à gauche  lorsque la tension inverse devient trop forte, elle conduit à un claquage destructif du thyristor.
- Lorsque la pression est positive, la valve s'appuie sur verrou et l'état de celui-ci va fixer le fonctionnement.
 - Si le verrou est enfoncé, il bloque la valve et le fluide ne peut circuler. La forme du verrou permet cependant son ouverture par la pression de la valve à partir d'une pression limite ; la valve s'ouvre alors et le fluide circule de gauche à droite égalisant la pression de part et d'autre de la valve  En polarisation directe et sans commande de gâchette, le thyristor reste bloqué jusqu'à une valeur limite de la tension et le courant i_{ak} est négligeable, au-delà de cette tension, le thyristor devient passant, le courant circule de l'anode vers la cathode et la tension V_{ak} tombe à une valeur proche de 0.
 - Si le verrou est tiré, la valve peut s'ouvrir même pour une faible pression et le fluide peut circuler  lorsqu'on applique une commande de gâchette, le thyristor devient passant dès que la tension V_{ak} est positive et le courant circule de l'anode vers la cathode.
- Lorsque la valve est ouverte, le verrou n'a plus d'action : la gâchette ne peut servir à bloquer le thyristor. La valve reste ouverte tant que le fluide circule avec une pression suffisante pour s'opposer à la tension du ressort : le thyristor reste passant tant qu'un courant minimal circule. Pour fermer la valve, il faut que le fluide cesse de circuler : pour bloquer le thyristor, il faut annuler le courant i_{ak} . Mais cela est insuffisant car la valve vient s'appuyer sur le verrou sans se bloquer derrière lui et l'application d'une pression positive ouvre la valve sans avoir à agir sur le verrou. Pour bloquer la valve il faut appliquer une pression négative qui la fait repasser entre valve et butée : pour bloquer le thyristor, il faut, après avoir annulé le courant, appliquer une polarisation négative, [36].

III.3.3. Structure du redresseur triphasé commandé double

alternance

Un redresseur double alternance triphasé est un redresseur permettant de redresser une source triphasée. Le signal redressé a alors une fréquence six fois supérieurs au signal d'entrée. Les tensions d'entrée utilisées constituent un système triphasé équilibré. Les tensions V_1 , V_2 et V_3 sont des tensions entre phase et neutre de valeur efficace V (voir la figure III.17).

Les fonctions Max et Min assurent que, [1], [6], [30], [34] :

- Parmi les thyristors T_1 , T_3 et T_5 , celle qui a la tension sur son anode la plus positive conduit ;
- Parmi les thyristors T_2 , T_4 et T_6 , celle qui a la tension sur sa cathode la plus négative conduit.

Chaque thyristor conduit pendant une durée de $2\pi/6$. On peut résumer les couples de thyristors qui conduisent en même temps en fonctions de la tension de charge comme suite :

Couple de thyristors	T_1 et T_6	T_1 et T_2	T_3 et T_2	T_3 et T_4	T_5 et T_4	T_5 et T_6
Tension de charge	U_{12}	U_{13}	U_{23}	U_{21}	U_{31}	U_{32}

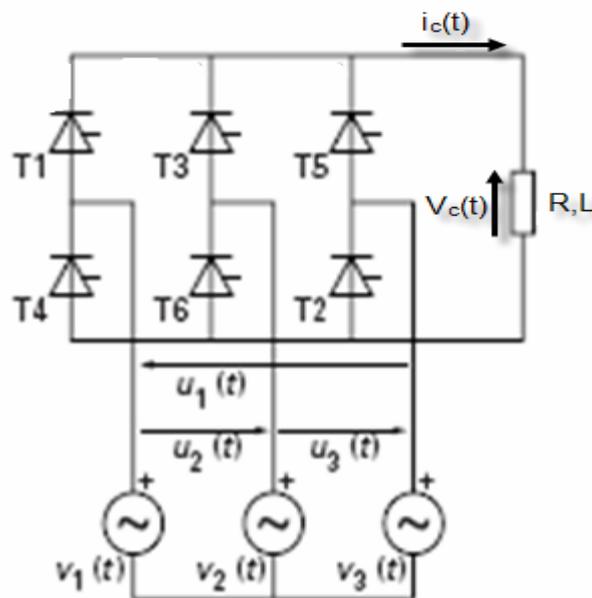


Figure III.17 : Structure d'un pont commandé

III.3.4. Calcul de la valeur moyenne de la tension de charge

La tension moyenne de charge est obtenue avec la formule suivante :

$$V_c = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} V \cos(\alpha) \quad \text{Avec } \alpha : \text{ c'est le retard à l'amorçage.}$$

III.3.5. Dimensionnement des thyristors

a) Contrainte en tension

La contrainte en tension peut se calculer comme suite

$$V_{Tinv \max} = V \sqrt{2}\sqrt{3}$$

b) Contrainte en courant

La contrainte en courant peut se calculer comme suite :

$$i_{Tmoy} = \frac{I_c}{3}, \quad i_{Teff} = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$$

III.4. Principe de l'association

L'alternateur démarre en moteur synchrone, le courant statorique est fourni par un convertisseur de fréquence et le champ rotorique par le système d'excitation de l'alternateur, entraînant avec lui la turbine à gaz. Lorsque la turbine à gaz atteint 70% de sa vitesse synchrone, c'est-à-dire 2100 tr/min, le système d'excitation et le convertisseur de fréquence s'éteignent et la turbine continue toute seule son accélération entraînant avec elle l'arbre de l'alternateur. Atteignant la vitesse synchrone, le système d'excitation de l'alternateur est de nouveau activé. L'alternateur est alors couplé au réseau pour produire de l'énergie électrique,[23].

Chapitre IV

ETUDE ET SIMULATION DE L'EXCITATRICE STATIQUE DE LA CENTRALE D'EL HAMMA II

Un convertisseur statique est un montage utilisant des interrupteurs à semi-conducteurs permettant par une commande convenable de ces derniers de régler un transfert d'énergie entre une source d'entrée et une source de sortie. La source d'entrée peut être un générateur ou un récepteur (idem pour la source de sortie). Dans notre cas, le convertisseur statique est un redresseur commandé tous thyristors alimenté à travers un transformateur dit d'excitation alimentant l'alternateur de la centrale de production d'EL HAMMA II en courant continu.

Dans ce chapitre une étude du convertisseur est effectuée, ensuite une simulation et interprétation des courbes est réalisée, et enfin, par manque de données sur la protection du convertisseur statique, nous donnerons une vue générales sur les différents types de protection pour que le convertisseur adopte un bon fonctionnement avec le minimum de risque de défaillances.

IV.1. Etude du convertisseur d'excitation

L'énergie indispensable à l'excitation de l'alternateur passe par un ensemble d'organes constituant le système d'excitation. Le courant d'excitation est amené à l'inducteur en passant par un convertisseur statique au moyen d'un système balais-bague. L'élément majeur dans cette opération étant le convertisseur statique, [40].

IV.1.1 Principe de fonctionnement du convertisseur

Pour fournir à l'inducteur une tension d'excitation continue variable on utilise actuellement presque toujours un montage redresseur. Celui-ci et sa commande constituent un variateur de tension et de courant. Le montage employé pour l'excitation de notre alternateur est un pont de greitz tous thyristors (voir la figure IV.2). Il permet le réglage et l'inversion de la tension U_f en cas de défaillance au niveau du circuit d'alimentation de l'inducteur, cette opération est réalisée en faisant fonctionner le redresseur en onduleur, c'est-à-dire, en réglant le retard à l'amorçage α supérieur à $\pi/2$, mais le courant ne peut changer de sens.

Le convertisseur est alimenté à travers un transformateur abaisseur dont les caractéristiques sont données ci-dessous, [10], [14], [33], [41].

PUISSANCE NOMINALE	2800 kVA
TENSION PRIMAIRE	6 kV
PRISES	$\pm 2 \times 2,5\%$
TENSION SECONDAIRE	540 V no load
FREQUENCE	50 Hz
COUPLAGE	Dy5

Figure IV.1 : Plaque signalétique du transformateur d'excitation

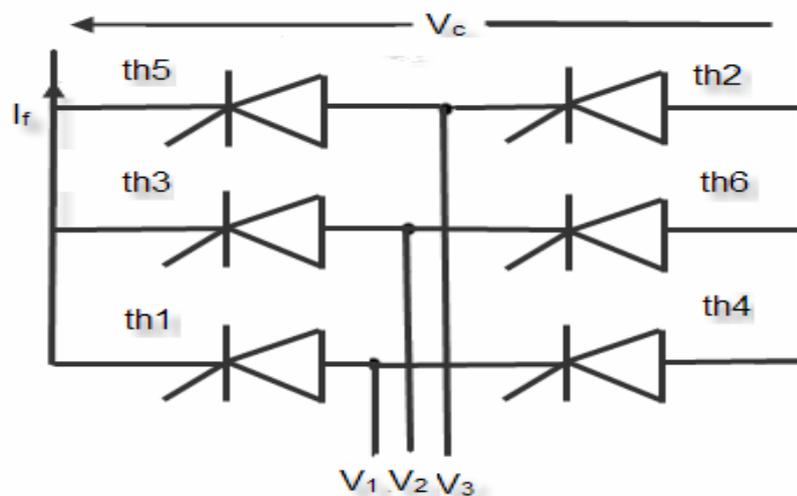


Figure IV.2 : Montage du redresseur commandé de la centrale d'EL HAMMA II

IV.1.2 Description du convertisseur d'excitation

La partie puissance du dispositif d'excitation se compose essentiellement de :

- Disjoncteur côté secondaire ;
- Para surtension côté réseau ;
- 3 ponts avec 6 blocs thyristors SITOR 6QA50 à ventilation forcée ;
- Fusible de branches avec surveillance ;
- Saisie des valeurs réelles de tension et du courant dans le circuit à courant continu ;
- Coupleur pour la protection de l'alternateur.

L'image ci-dessous représente l'armoire où sont logés les thyristors du pont d'excitation.



Figure IV.3 : Armoire d'excitation statique

Les thyristors employés dans la centrale d'El HAMMA II sont des boîtiers pressés (voir figure IV.4). Ces derniers sont utilisés depuis des années en électronique de puissance, en particuliers pour des applications de fortes puissances. Le principe du boîtier pressé permet de maximiser la surface de passage du courant et du flux thermique. Les contacts thermiques et électriques sont assurés par une mise en pression du composant, [42].



Figure IV.4: Thyristor press-pack

Les boîtiers sont constitués (voir figure **IV.5**, **IV.6**) d'un wafer pris entre deux disques de molybdène. Les contacts électriques se font par les pôles d'anode et de cathode. Les pôles de contact sont en cuivre nickelé. L'isolation électrique entre l'anode et la cathode est assurée par un anneau en céramique. Dans ce type de boîtiers, les pièces sont flottantes, aucune brasure, soudure ou sertissage n'est nécessaire pour le maintien des pièces. Les contacts électriques et thermiques sont réalisés par la mise en pression du composant dans une bride. C'est pour cette raison que les disques de maintien sont en molybdène (Mo) car ce matériau se déforme peu sous de fortes pressions.

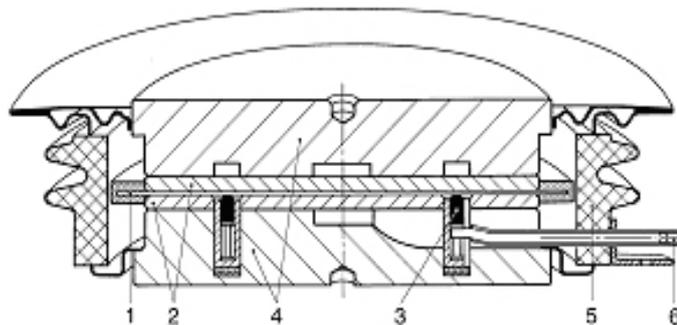


Figure IV.5: Constitution d'un thyristor press-pack

1. Wafer
2. Disques de molybdène
3. Electrode de gâchette
4. Masselottes de cuivre
5. Anneau céramique
6. Connexions de gâchette



Figure IV.6 : Vue éclatée d'un boîtier pressé à diode intégrée

1. Wafer à diode intégrée
2. Masselotte d'anode
3. Masselotte de cathode à gâchette inter-digitée
4. Disque molybdène d'anode
5. Disque molybdène de cathode

IV.2. Simulation de l'excitatrice statique

Afin de mûrir à bien notre travail, nous avons utilisé l'environnement MATLAB pour simuler le fonctionnement de l'excitatrice statique couplée au turboalternateur, [4]. Le bloc power system contient un modèle prédéfini du système d'excitation à base de thyristors, en considérant le rotor du turboalternateur comme étant une charge $(R, L) = (0.111\Omega, 0.0033H)$. Le turboalternateur fonctionne avec une tension d'excitation $U_f = 434 \text{ v}$ et un courant d'excitation $I_f = 2700 \text{ A}$. La tension d'entrée du convertisseur est de $U = 540 \text{ v}$. (Tension composée).

IV.2.1. Schéma de simulation

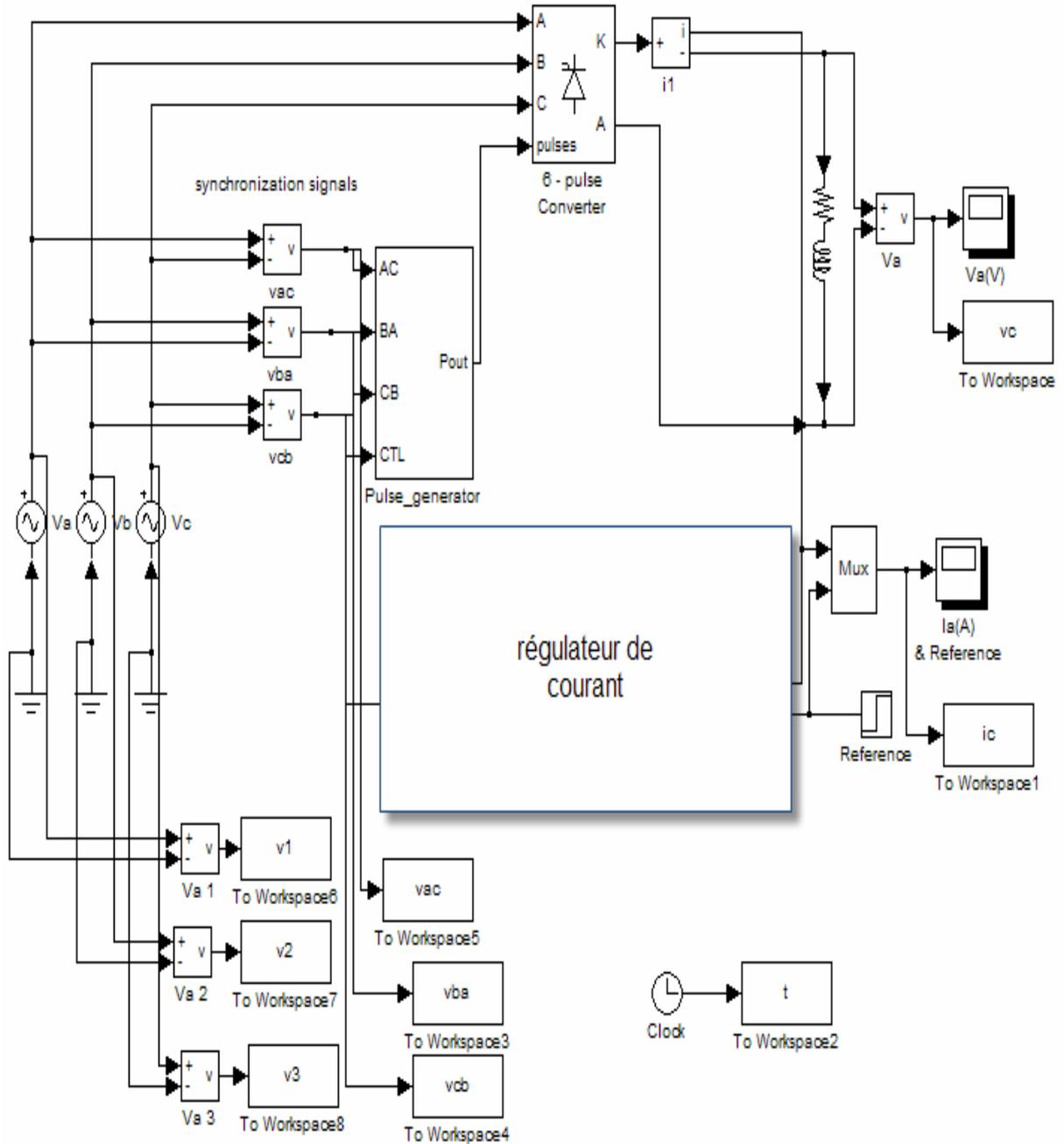


Figure IV.7 : Schéma de simulation

IV.2.2. Représentation des différentes tensions et courants à l'état sain du convertisseur

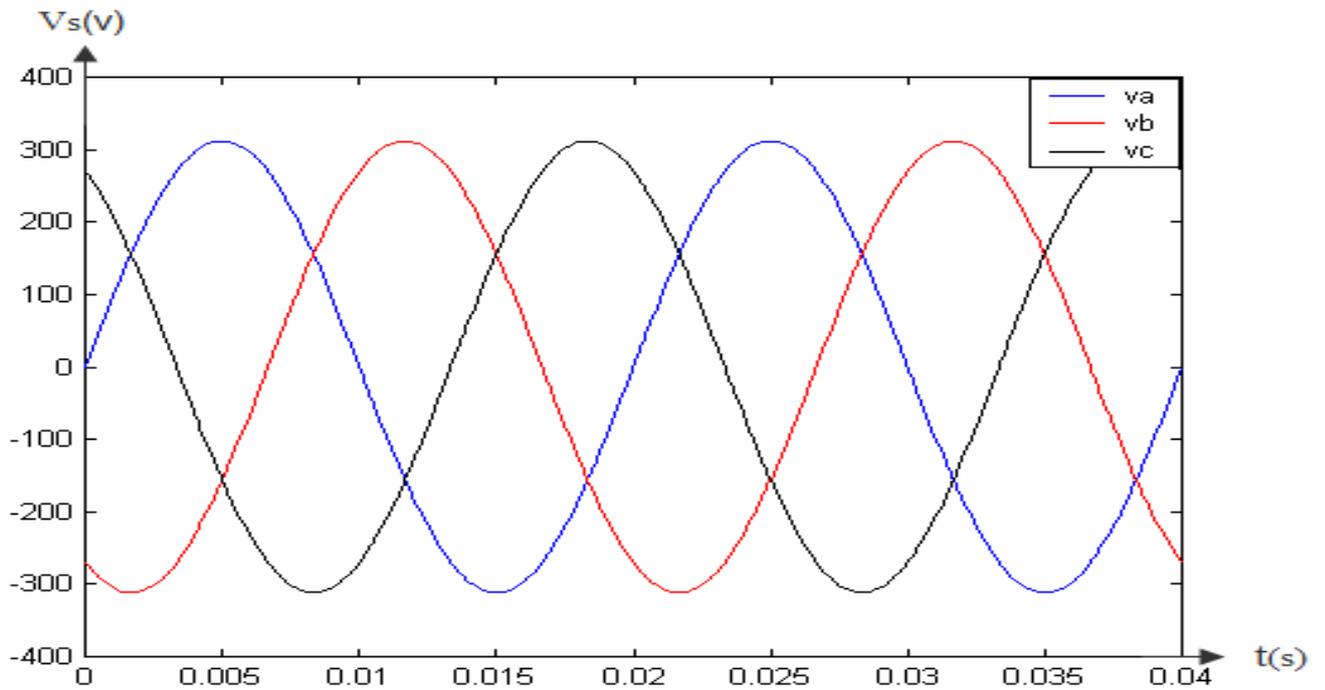


Figure IV.8 : Les différentes tensions simples

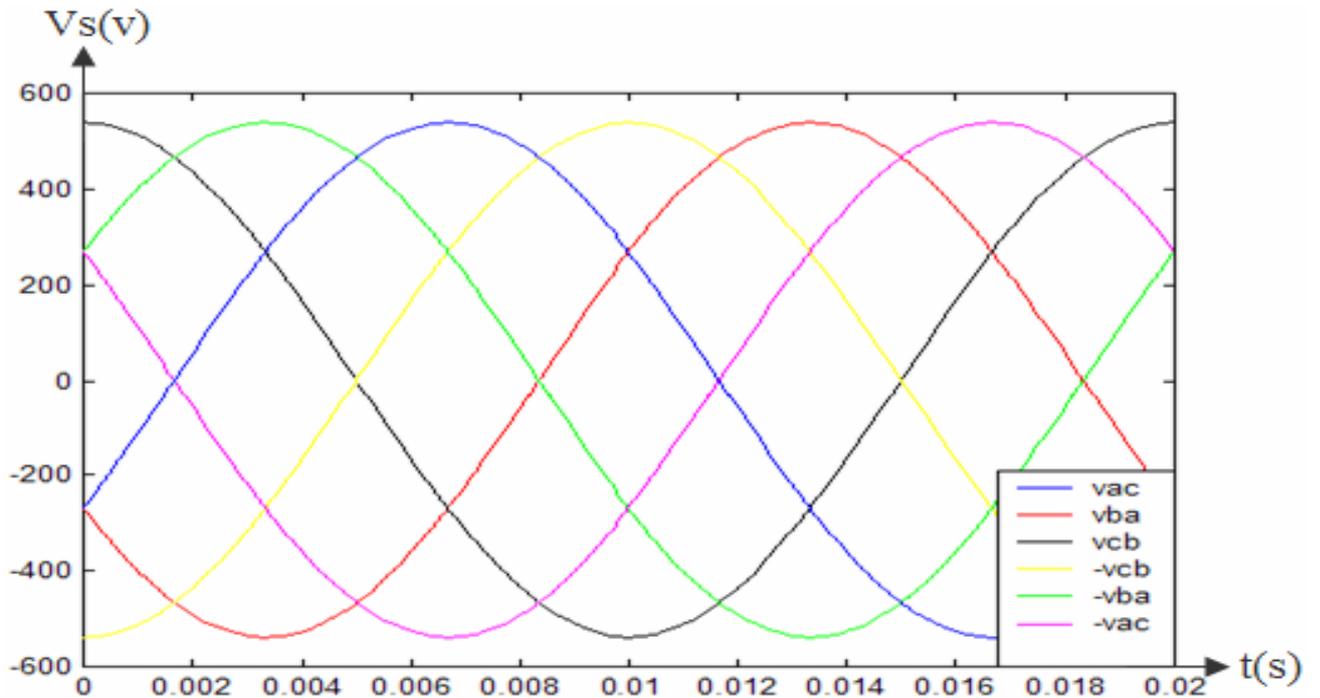


Figure IV.9: Les différentes tensions composées

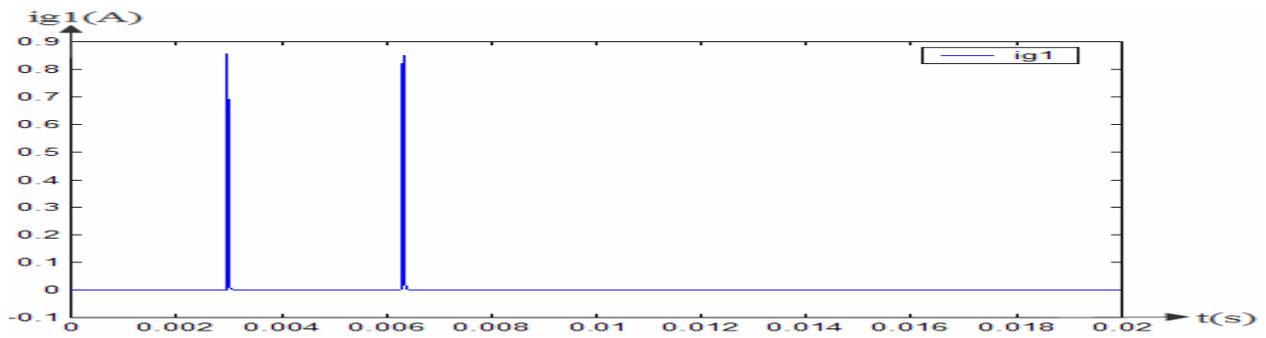


Figure IV.10 : Le courant de gâchette $ig1$

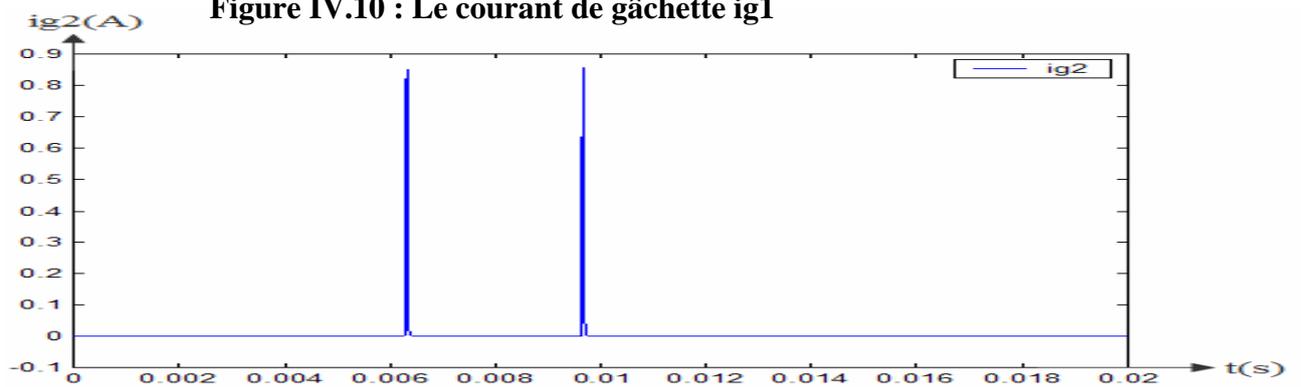


Figure IV.11 : Le courant de gâchette $ig2$

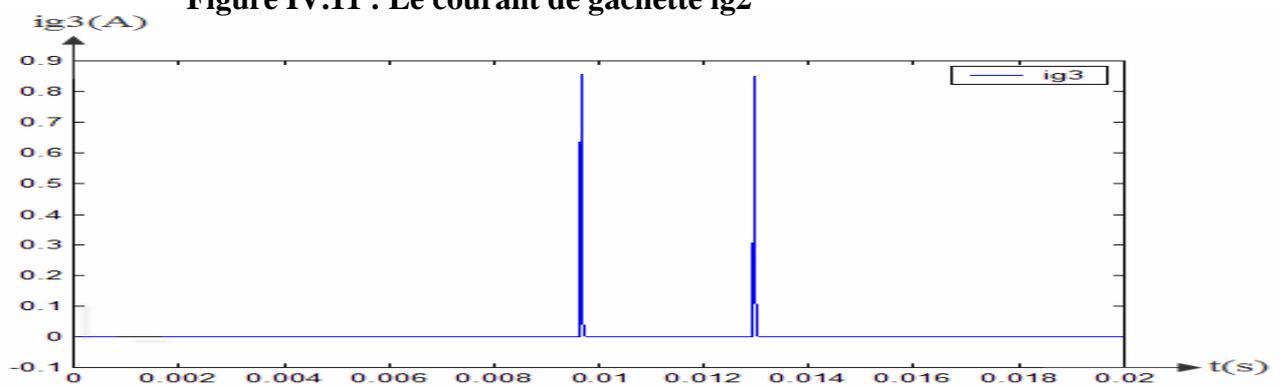


Figure IV.12 : Le courant de gâchette $ig3$

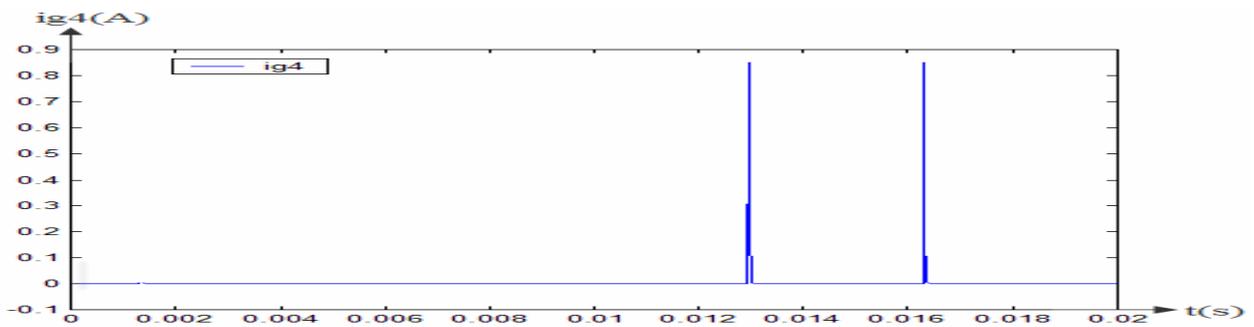


Figure IV.13 : Le courant de gâchette $ig4$

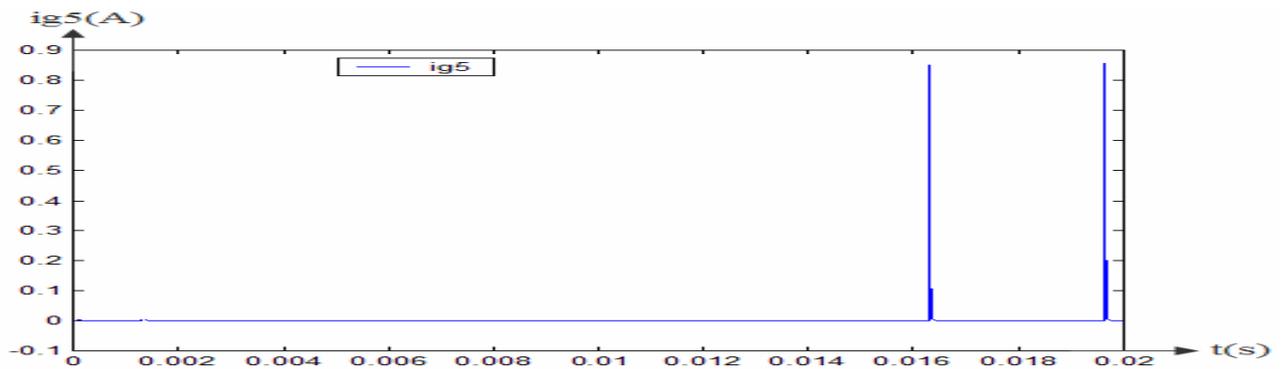


Figure IV.14 : Le courant de gâchette $ig5$

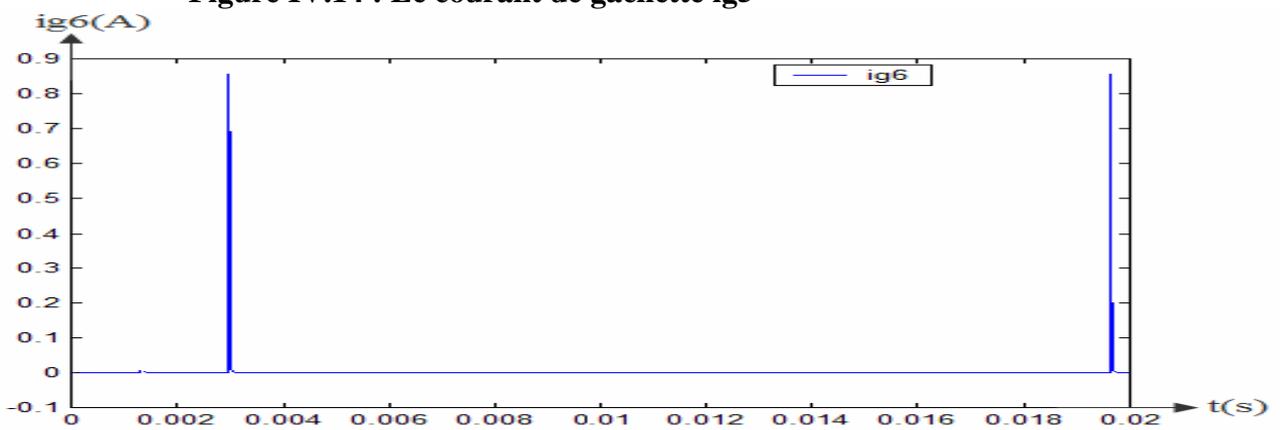


Figure IV.15 : Le courant de gâchette $ig6$

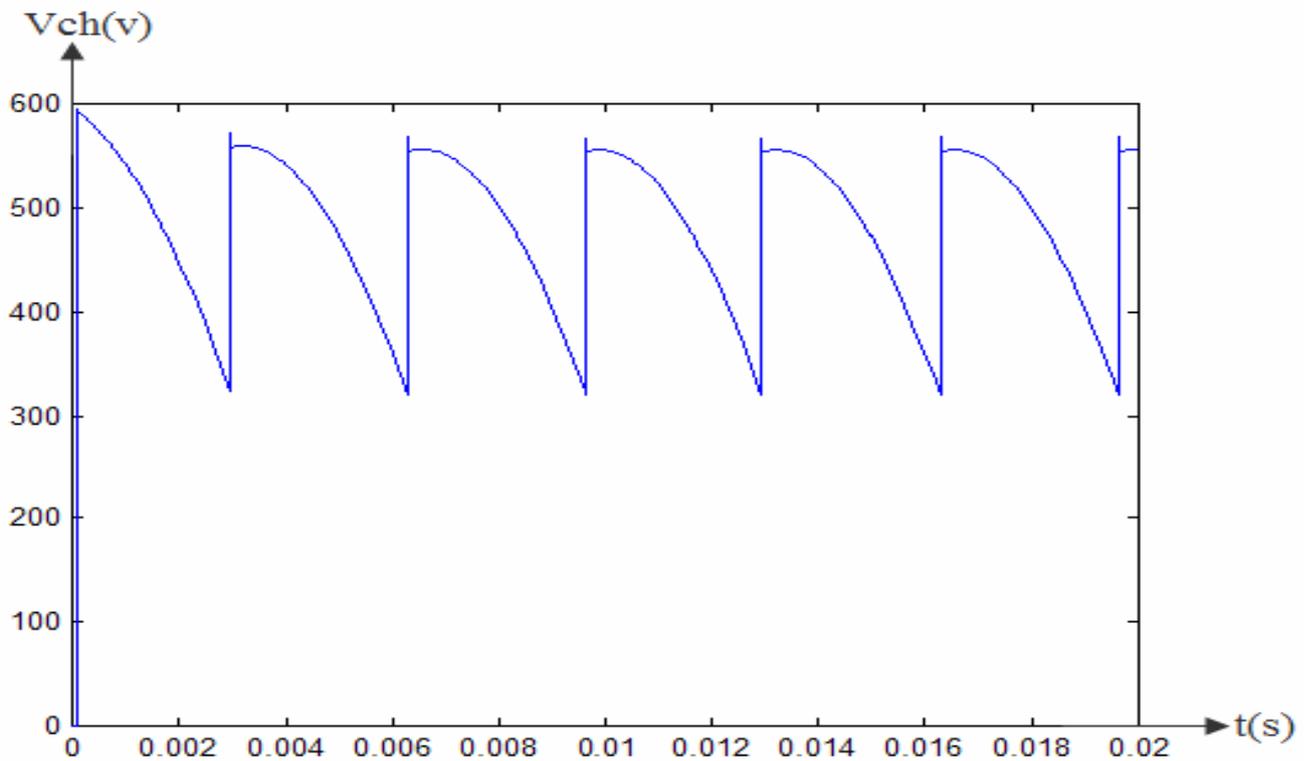


Figure IV.16 : La tension aux bornes de la charge

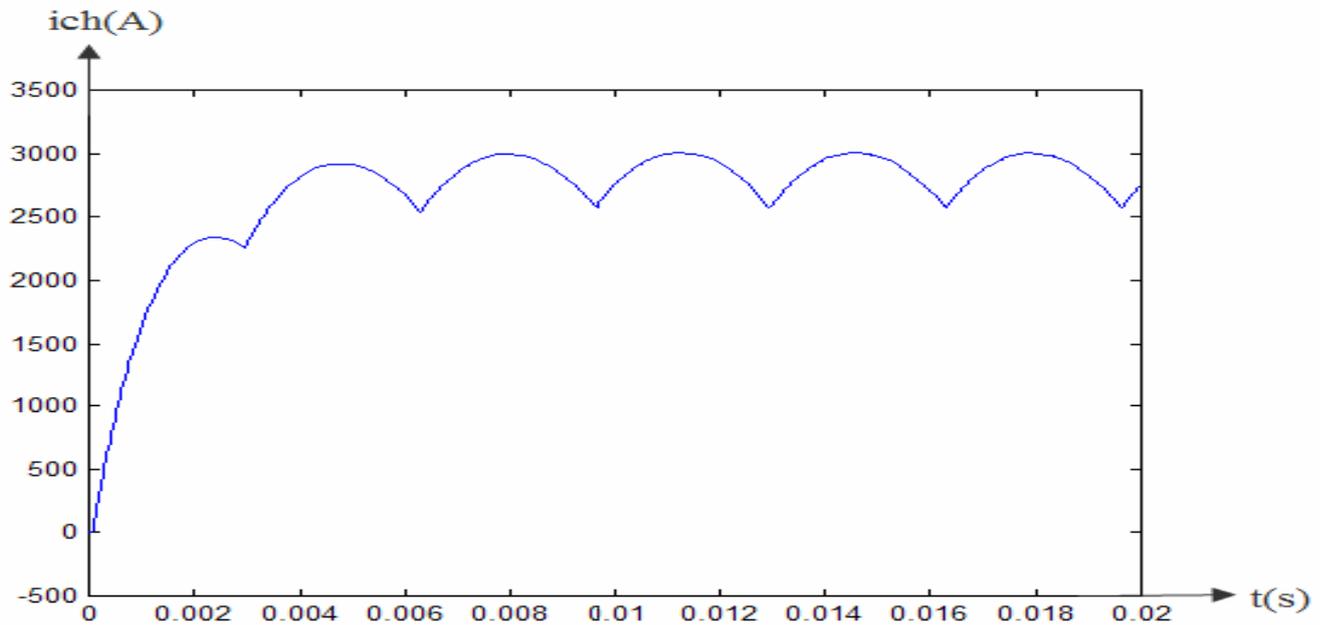


Figure IV.17 : Le courant traversant la charge

Remarque : un thyristor reçoit deux impulsions, la deuxième est envoyée $\pi/3$ plus loin que la première, elle est dite de confirmation.

IV.2.3. Les causes pouvant provoquer une défaillance du thyristor

La destruction d'un thyristor peut avoir des conséquences importantes des points de vue matériel, financier et humain. Lors d'un dysfonctionnement, un thyristor peut exploser et prendre feu. Il peut endommager le matériel environnant et éventuellement détruire la totalité de l'installation électrique dans laquelle le thyristor est implanté. Il s'avère indispensable de protéger les thyristors. La principale cause de destruction du thyristor est thermique. L'élévation de température excessive du composant provoque un claquage du composant.

L'élévation anormale de la température peut être provoquée de différentes manières :

- Cyclage et fatigue thermique : l'augmentation des résistances thermiques des composants due au cyclage thermique engendre une augmentation anormale de la température du thyristor en fonctionnement normal. Les brasures se fragilisent lors des cycles de températures. Le contact surfacique se dégrade et le transfert thermique diminue (résistance thermique locale augmente).

La température et l'excursion de température augmentent jusqu'à arriver à la destruction du composant ;

- Court-circuit : en cas de court-circuit, la puissance dissipée par les composants est énorme. La température croît très rapidement. Sans protection, le composant est détruit en un temps assez court, de quelques μs à quelques dizaines de μs ;
- Amorçage dynamique : la structure quatre couches du thyristor peut être amorcée de façon irréversible lors de fortes variations de la tension dv/dt sur le composant. Le composant n'est plus commandable à l'ouverture par la grille et est voué à une mort rapide ;
- Avalanche : lors de l'ouverture du composant, une surtension est observée, elle est due à la décroissance du courant dans les inductances. Cette surtension peut atteindre la tension limite du composant et provoquer l'avalanche de celui-ci. L'énergie d'avalanche et la répétitivité du phénomène engendrent une augmentation de la température des thyristors, [5], [45], [46], [47].

Dans la simulation, ce défaut se présente sous forme de circuit ouvert au niveau du thyristor défaillant.

On aura à considérer deux cas :

- Un claquage d'un thyristor se situant dans la cathode commune ;
- Un claquage d'un thyristor se situant dans l'anode commune.

Ensuite, nous allons nous mettre dans le cas extrême, c'est-à-dire, le claquage de deux thyristors. Trois cas peuvent se présenter :

- Les deux thyristors se situent dans la cathode commune ;
- Les deux thyristors se situent dans l'anode commune ;
- Un thyristor de la cathode commune, l'autre de l'anode commune.

Les tensions et les courants de charges sont représentés ci-dessous. Pour mieux refléter cette influence, on a superposé les deux courbes, celles du dispositif sain et du dispositif défaillant.

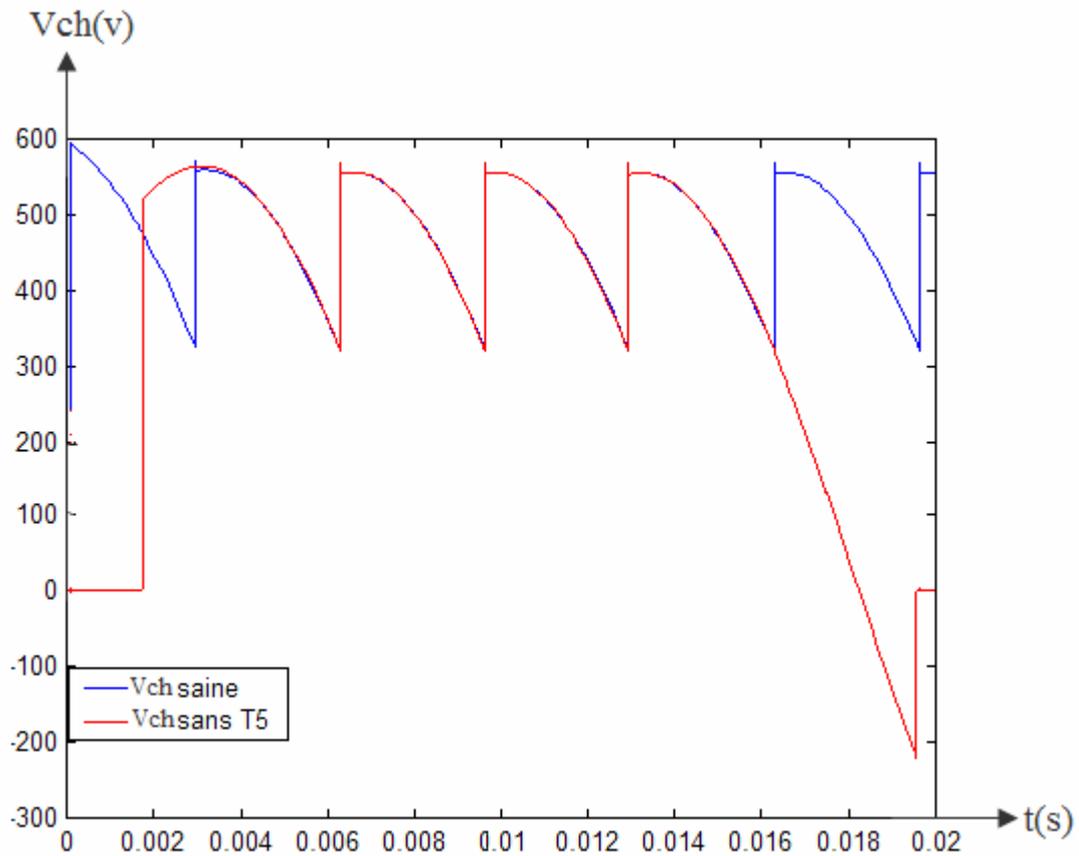


Figure IV.18 : La tension aux bornes de la charge avec claquage de T5

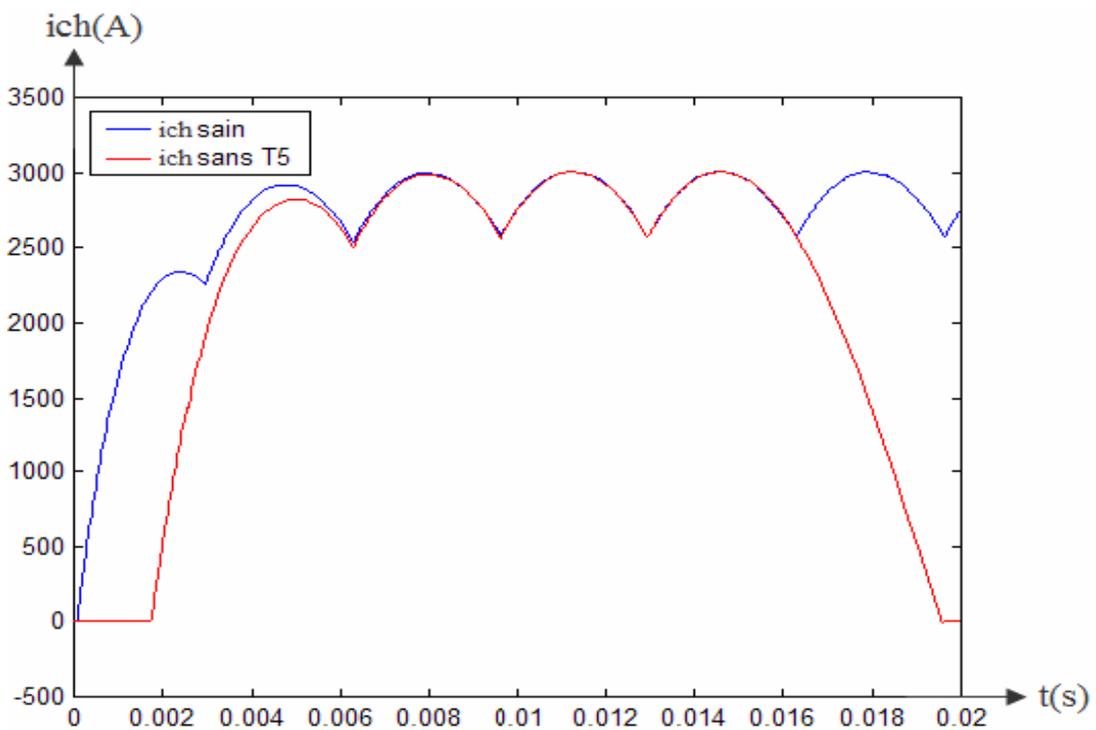


Figure IV.19 : Le courant traversant la charge avec claquage de T5

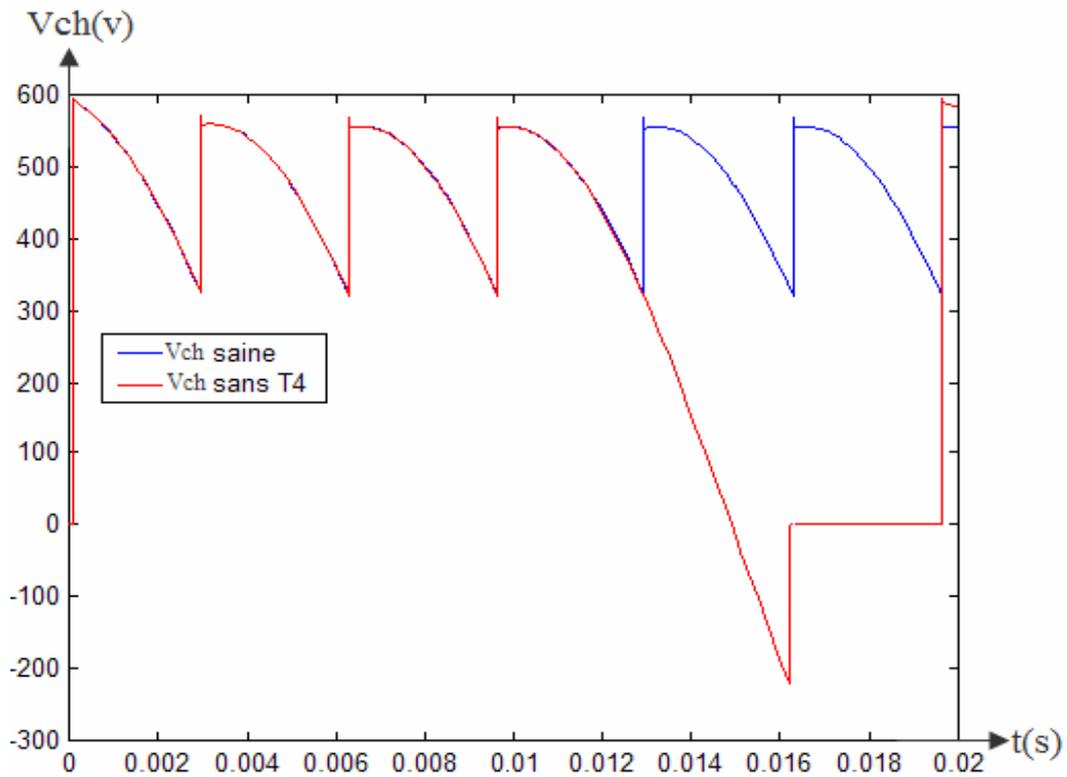


Figure IV.20 : La tension aux bornes de la charge avec claquage de T4

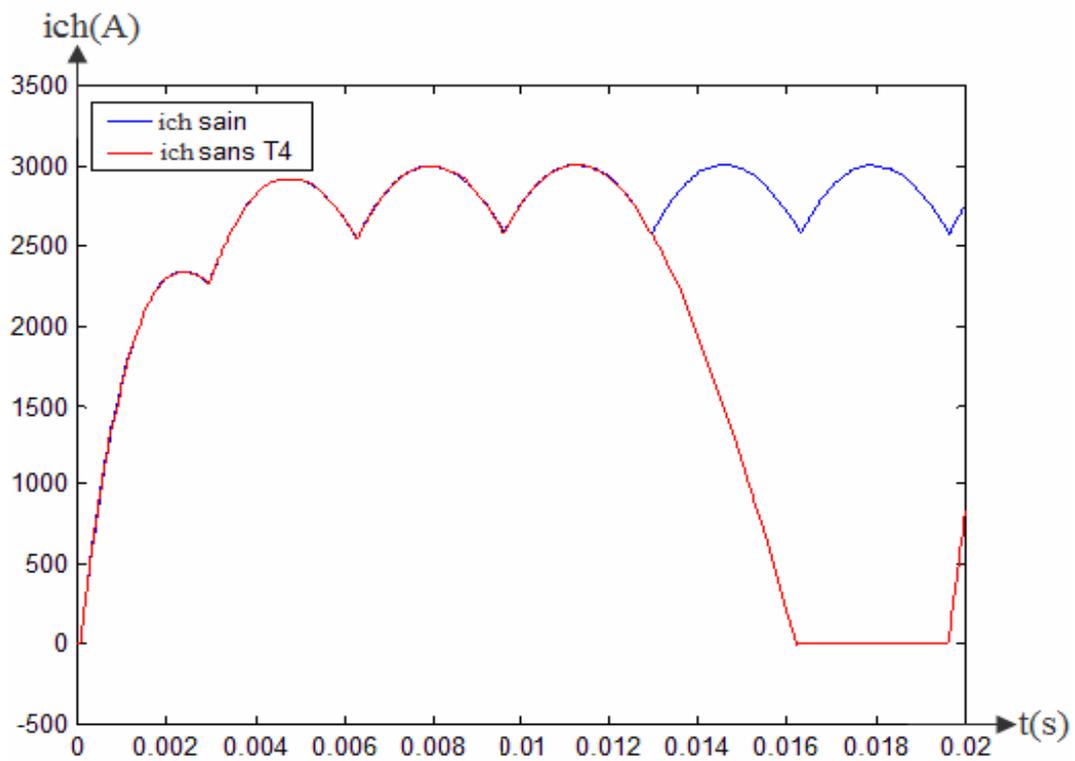


Figure IV.21 : Le courant traversant la charge avec claquage de T4

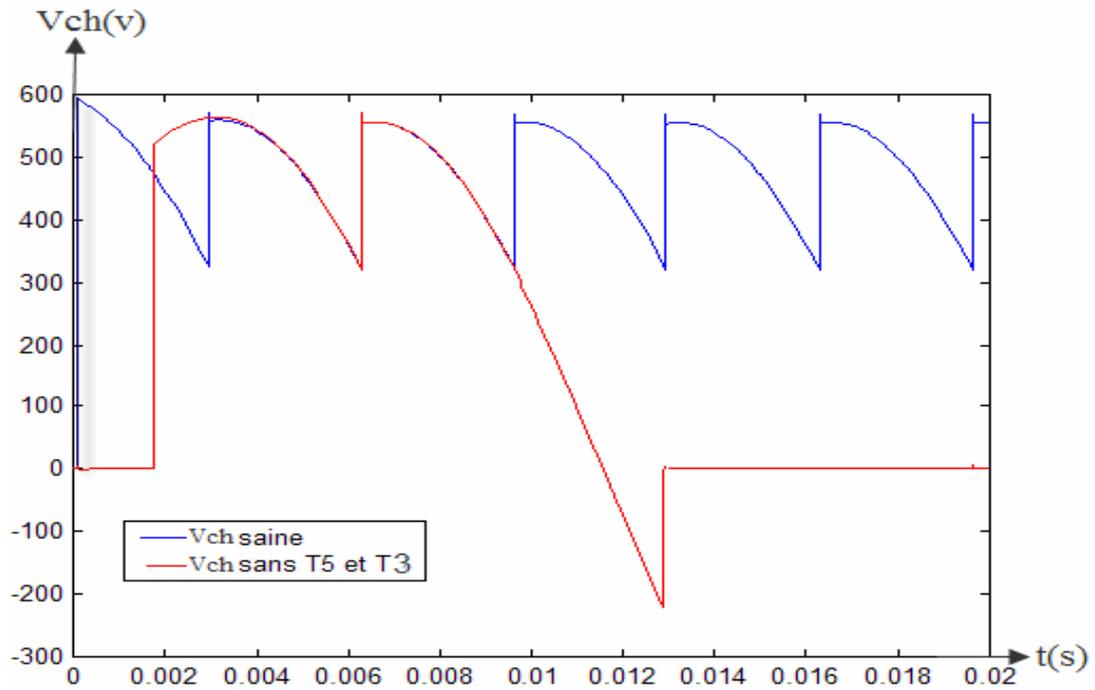


Figure IV.22 : La tension aux bornes de la charge avec claquage de T5 et de T3

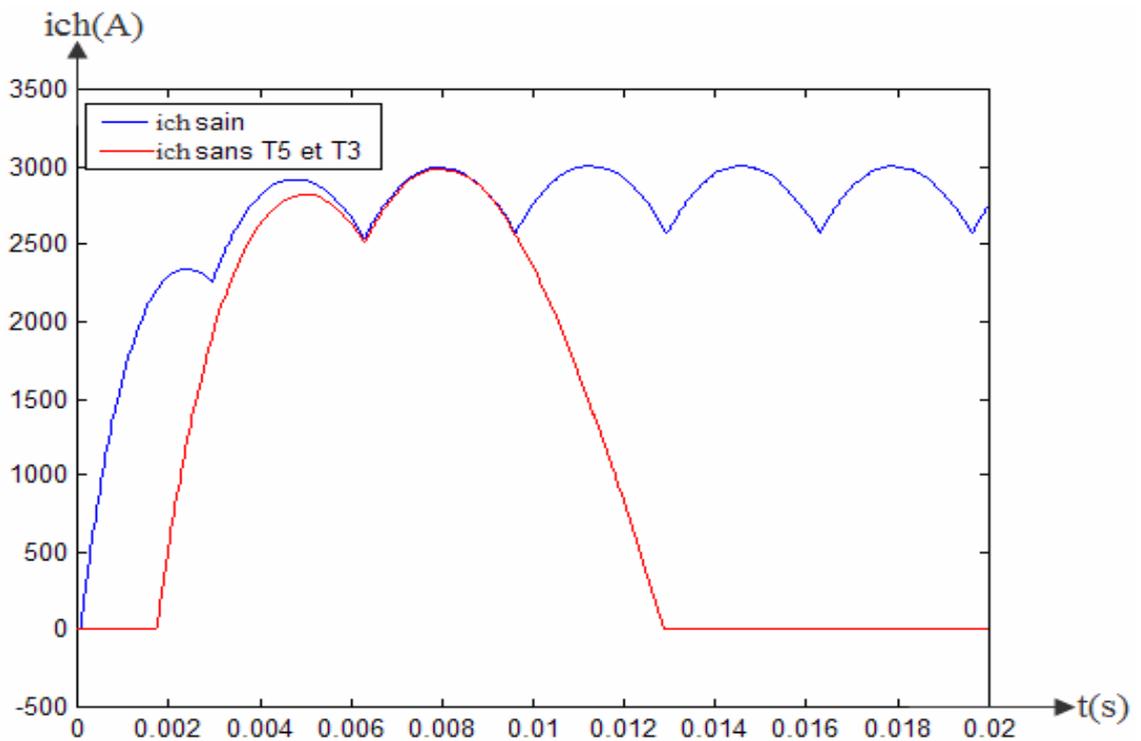


Figure IV.23 : Le courant traversant la charge avec claquage de T5 et de T3

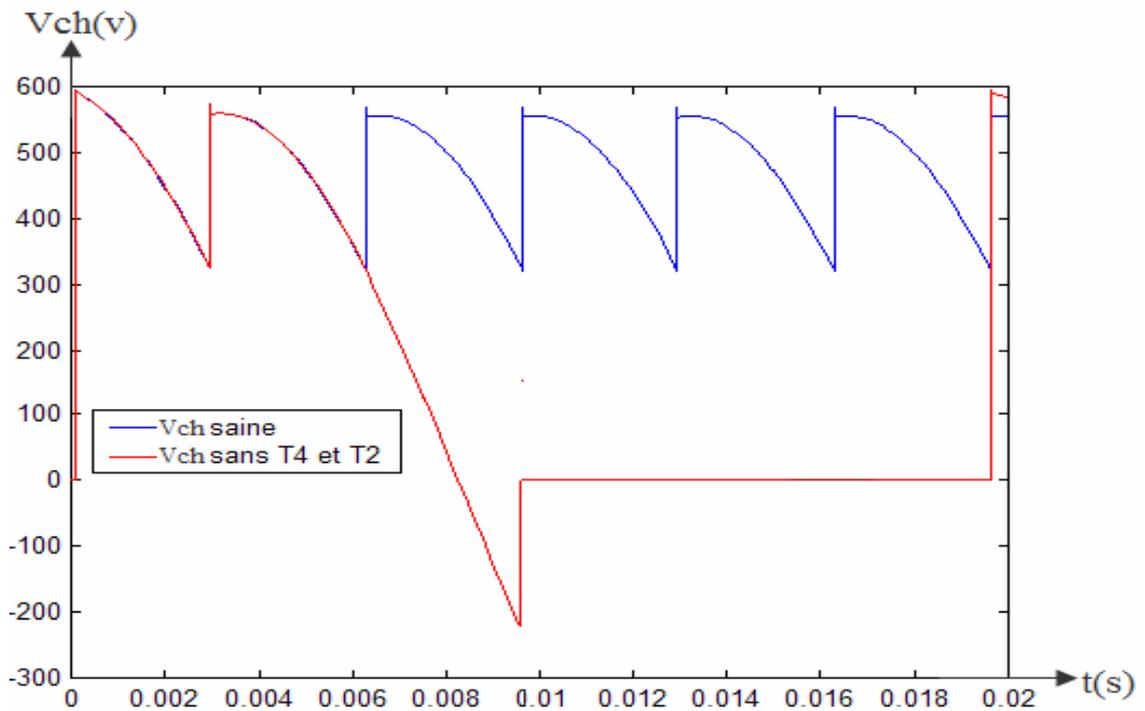


Figure IV.24 : La tension aux bornes de la charge avec claquage de T4 et de T2

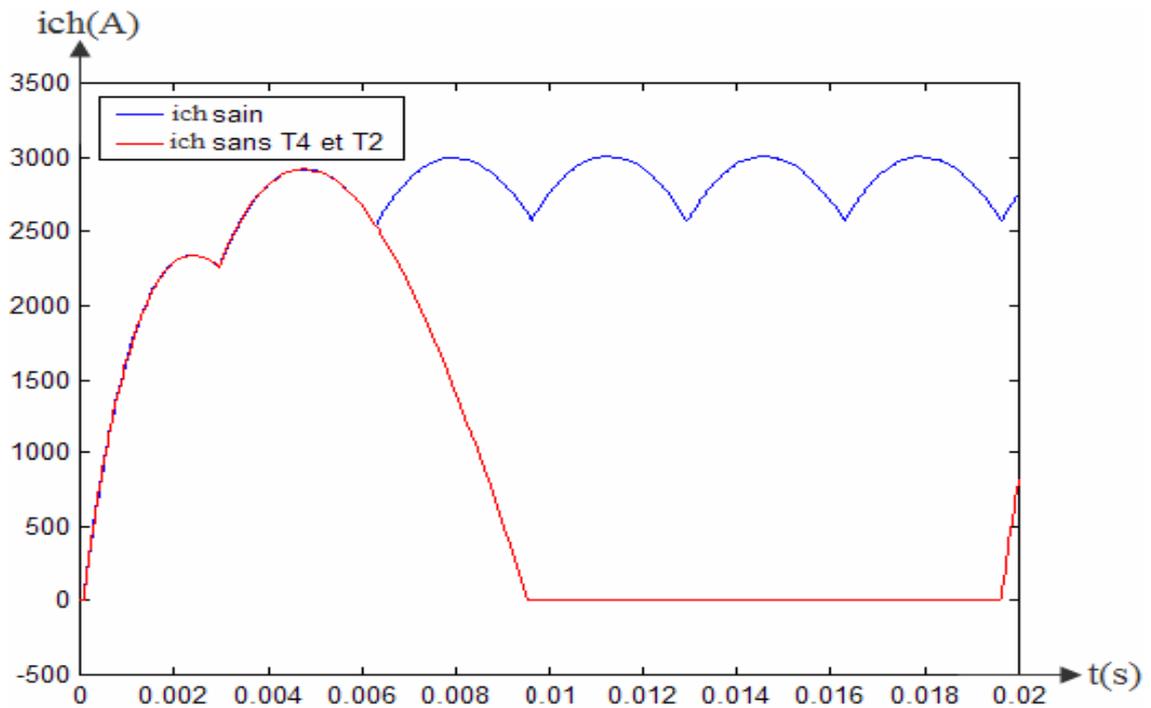


Figure IV.5: Le courant traversant la charge avec claquage de T4 et de T2

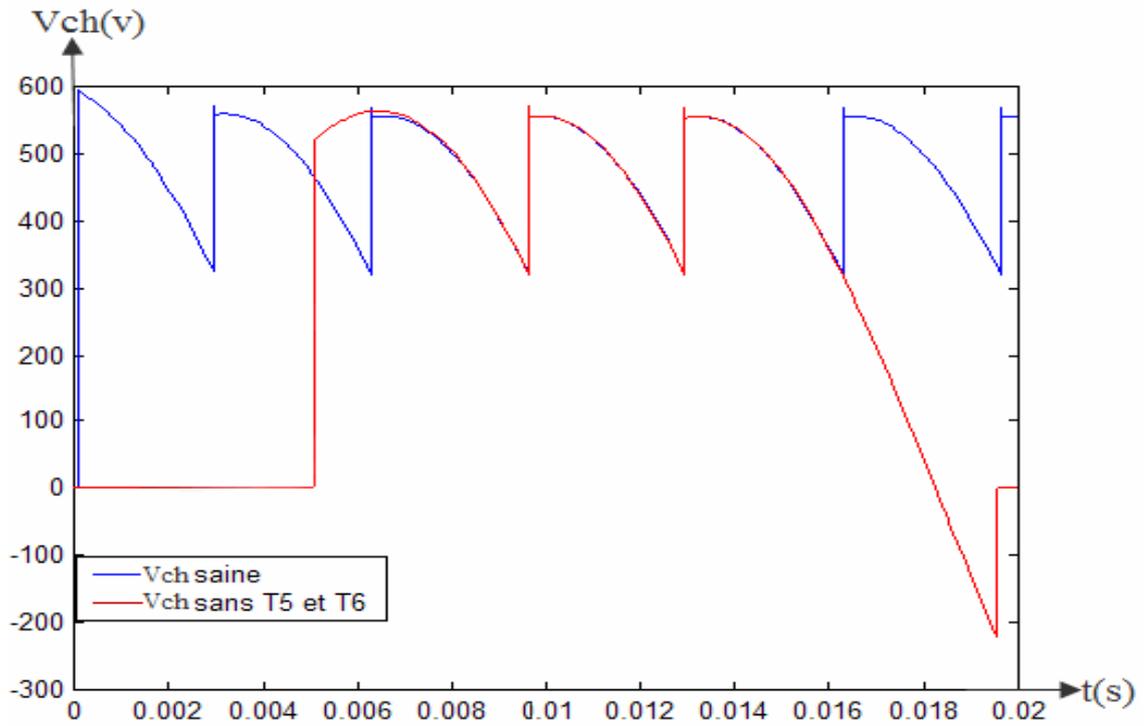


Figure IV.26 : La tension aux bornes de la charge avec claquage de T5 et de T6

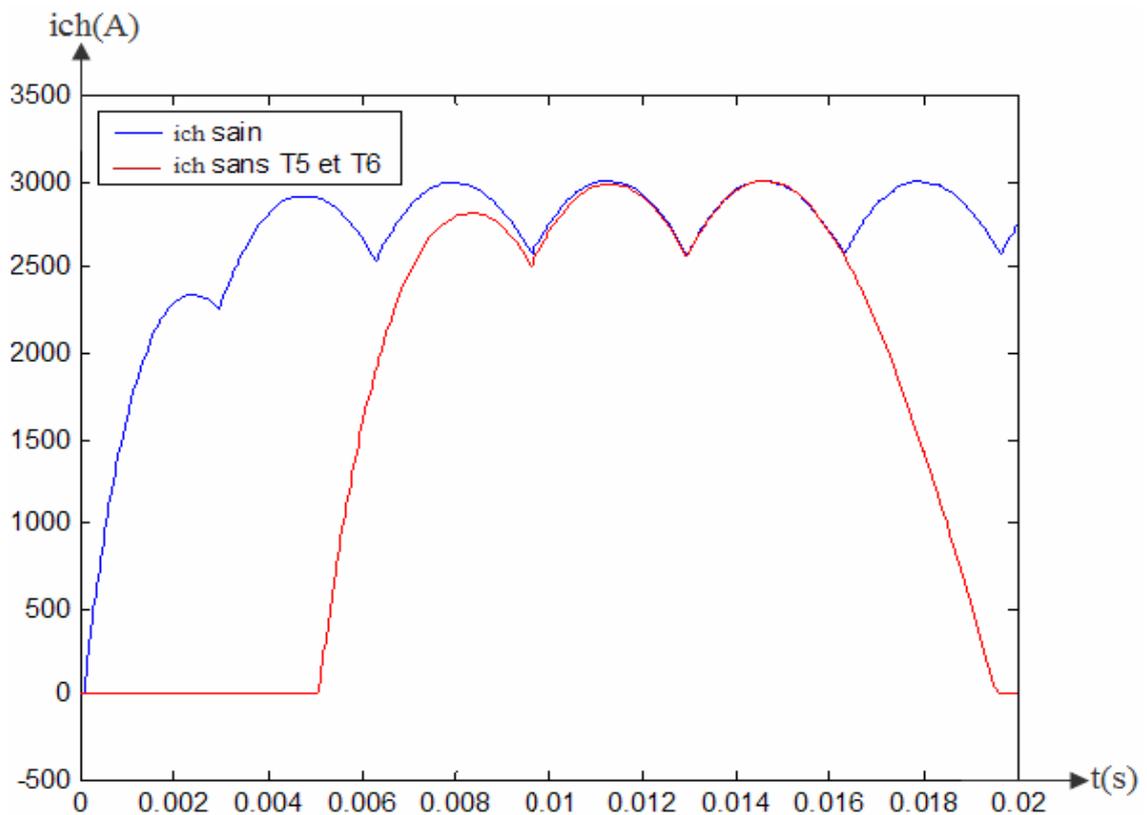
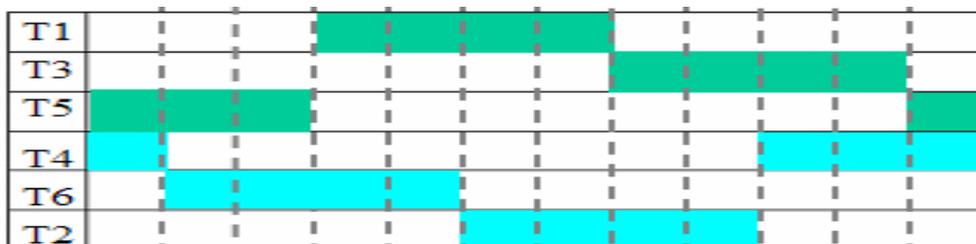


Figure IV.27 : Le courant traversant la charge avec claquage de T5 et de T6

IV.2.4. Interprétation des courbes

Lorsque le redresseur est sain, la succession d'amorçages des thyristors est schématisée comme suite :

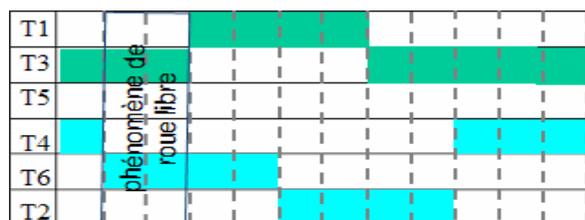


**Figure IV.28: Schéma de succession d'amorçages des thyristors dans le cas
D'un redresseur sain sur une période**

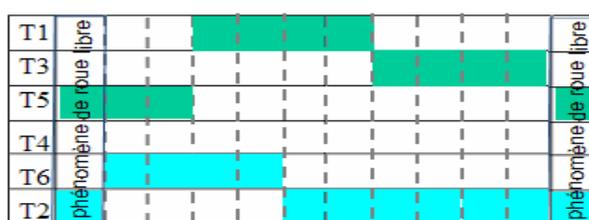
Mais quand un défaut ou une défaillance survient au niveau d'un ou plusieurs thyristors à cause des raisons citées auparavant, cette succession est interrompue. Le thyristor qui conduisait avant celui qui est défectueux ne s'arrête pas jusqu'à ce qu'une tension inverse s'applique sur ces bornes.

Par exemple, lorsqu'une défaillance survient au niveau du thyristor T₅, le thyristor T₃ continu de conduire jusqu'à ce que le thyristor T₁ prenne la relève. Cependant, lorsque cette succession d'amorçages des thyristors est interrompue, à un moment donné, les thyristors du même bras conduisent en même temps et un phénomène de roue libre est observé, ce qui provoque une singularité de la tension et du courant de charge, ce qui a pour conséquence l'arrêt prématuré du groupe turboalternateur.

Les courbes obtenues par la simulation illustrent ce phénomène à des moments décalés dans le temps en fonction du ou des thyristors défaillants. Les schémas suivants donnent les moments où le phénomène de roue libre est observé, et chaque schéma correspond à un résultat obtenu par simulation.



**Figure IV.29: Succession d'amorçages des
des thyristors sans T5**



**Figure IV.30: Succession d'amorçages
des thyristors sans T4**

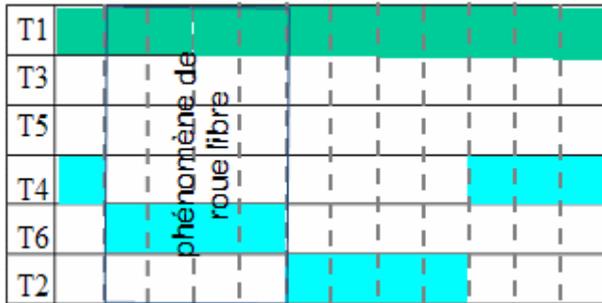


Figure IV.31: Succession d'amorçage des thyristors sans T5 et T3

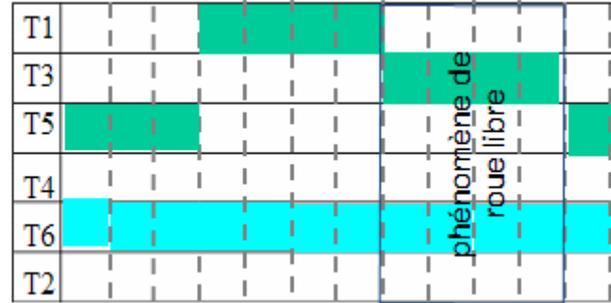


Figure IV.32 : Succession d'amorçage des thyristors sans T4 et T2

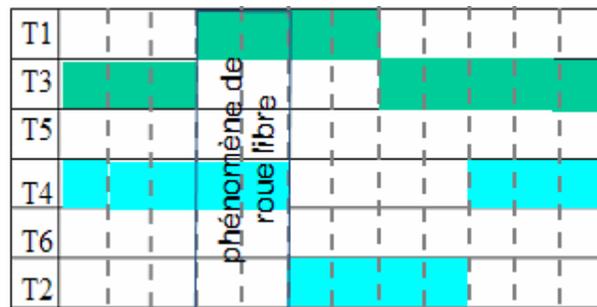


Figure IV.33: Succession d'amorçages des thyristors sans T5 et T6

Pour éviter ce genre de défaillance dans le fonctionnement du convertisseur statique qui peuvent avoir plusieurs conséquences allant de la destruction du dispositif d'excitation à la rupture de la production d'électricité au niveau de la centrale de production, il faut mettre en œuvre des protections pour les éléments constitutifs du convertisseur statique qui sont les thyristors, dans notre cas, et pour manque de données des protections existantes dans la centrale, nous donnerons les différents types de protections que doit avoir le convertisseur statique dans le cas général.

IV.3. Protection des semi-conducteurs

Un convertisseur statique est fragile quand nous tenons compte de la faible énergie qu'il est capable de dissiper par lui-même par rapport à l'énergie qu'il contrôle. Il est donc nécessaire d'introduire des protections. Une protection est un composant ou un ensemble de composants, internes ou externes à l'interrupteur principal, permettant d'abaisser le niveau de contrainte électrique ou thermique appliqué à cet interrupteur.

La protection agit généralement en deux temps : la limitation de la contrainte (limiteur de courant, ...) ce qui est une protection dynamique, puis la suppression de la contrainte (disjoncteur,...), protection statique.

La protection ne doit pas être confondue avec les circuits d'aide à la commutation, car une protection agit en situation de fonctionnement anormal, ce qui correspond à un défaut de commande, une défaillance physique d'un autre composant, une contrainte environnementale hors spécification, ou lors d'un usage hors spécification du montage (surcharge, court-circuit, injection d'énergie, ...).

Il faut noter que, quand la contrainte est connue, une alternative consiste à en tenir compte dans le dimensionnement du composant et de durcir spécifiquement la grandeur liée à cette contrainte. Cette dernière n'est plus alors tout à fait une contrainte.

Les circuits de protection doivent répondre dans un temps très court, de l'ordre de la microseconde. Le problème est plus critique dans le cas d'une surtension (le composant se met en avalanche dès que le champ local dans le volume et en périphérie atteint le seuil de claquage). Pour atteindre ces niveaux de rapidité, il est impératif de placer les circuits de protection au plus près du composant, voir dans la puce elle-même.

Nous nous retrouvons donc avec deux types de protections : des protections actives qui sont intégrées dans la puce et des protections passives qui sont externes. Elles sont toutes deux de type semi-conducteur, placées directement au niveau des interrupteurs, mais qui resteront «transparentes» en fonctionnement normal du convertisseur statique.

Les deux types de protection à fournir sont des protections contre les surintensités (surcharge ou court-circuit) et les surtensions rapides. Dans le premiers cas, le souci de la limitation de la température de la puce peut rentrer en ligne de compte, soit la température globale en cas de surcharge, soit au niveau d'un point chaud formé au sein de la puce en cas de court-circuit, [28], [29], [42], [43].

IV.3.1. Protection en courant

Dans un bloc redresseur, les surintensités peuvent être provoquées soit par des courts-circuits à ses bornes, soit par des surcharges.

a) Protection contre les surcharges

Le thyristor pouvant supporter des courants de surcharge élevés pendant 10 ms, sa protection doit donc couper le courant avant que celui-ci n'atteigne une valeur critique qui provoquera la destruction de l'élément redresseur. Pour ce faire, il existe deux possibilités de protection : protection par fusibles rapide et protection par disjoncteur. Le fusible doit avoir une contrainte thermique inférieure à celle du thyristor et un temps de fusion inférieur à 10 ms.

b) Protection contre les di/dt

La protection en di/dt est assurée par une inductance L de quelques μH (voir la figure IV.34) placée en série avec le thyristor. Si V_D est la tension de blocage direct, le courant augmente lors de l'amorçage avec une pente V_D / L , valeur qui doit être inférieure à $(di/dt)_{\text{max}}$.

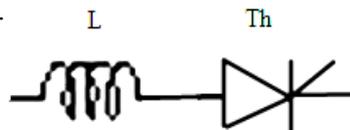


Figure IV.34 : Montage assurant la protection contre di/dt

IV.3.2. Protection en tension

La surtension peut être due soit à la commutation des thyristors, soit à la fusion d'un fusible.

a) Surtension due à la commutation des thyristors

La protection en dv/dt est généralement assurée par un circuit R-C (voir la figure IV.35) placée en parallèle avec le thyristor.

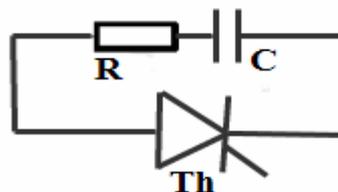


Figure IV.35 : Montage assurant la protection contre les dv/dt

b) Surtension due à la fusion d'un fusible

La fusion d'un fusible peut entraîner une surtension aux bornes du thyristor qu'il protège. Cette surtension est telle que, en général, elle ne dépasse pas la tension inverse admissible par le thyristor. On ne prévoit donc pas de protection pour ce phénomène.

Remarque

Bien évidemment, il faudra prévoir une protection thermique par radiateur.

IV.4.Conclusion

La simulation du système de conversion statique sous environnement MATLAB a eu pour but d'observer l'influence d'un défaut, au niveau du thyristor, sur le fonctionnement du turboalternateur de la centrale de production d'EL HAMMA II. Ce défaut a causé la destruction du composant et fait paraître une zone neutre de tension et de courant au niveau du turboalternateur, ce qui provoque l'arrêt prématuré de ce dernier.

Compte tenu des coûts des convertisseurs à base de thyristor, on comprend l'intérêt de mettre en œuvre des systèmes de protection pour la thermique, les courts-circuits, les surintensités et les surtensions. De plus lorsque, ce système alimente l'élément majeur d'une centrale de production, qui est le turboalternateur, il doit être parfaitement fonctionnel, sans qu'il y ait de défaillance qui pourra avoir comme conséquence l'arrêt brusque du groupe, d'où l'interruption de la production d'électricité au niveau de la centrale.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire a eu pour objectif l'étude de l'influence de la défaillance qui s'est produite au niveau du système d'excitation du turboalternateur de la centrale d'EL HAMMA II, plus précisément, au niveau du thyristor du système d'excitation qui a eu pour conséquence la destruction du thyristor et la rupture de la production d'électricité le temps d'isolé le pont défectueux, et de basculer l'alimentation du turboalternateur en courant continu vers les deux autres ponts déjà existant. Et pour cela, nous avons réalisé une simulation sous environnement MATLAB en considérant l'alternateur comme une charge (R,L) pour observer le phénomène qui s'est produit lors de cette défaillance. Pour cela nous avons visualisé la tension et le courant du turboalternateur et nous avons observé l'apparition de zone neutre du à un phénomène de roue libre lors de la défaillance provoquant l'arrêt brusque du turboalternateur.

Cette défaillance pourrait être du principalement à l'élévation excessive de la température au sein du thyristor constituant le convertisseur statique, cette dernière est du soit à un cyclage et fatigue thermique, soit à un court-circuit, soit à un amorçage dynamique, ou encore à une avalanche, d'où la nécessité de mettre en œuvre d'avantage de dispositif de protection, cela diminuera le risque de défaillance et garantira la continuité de la production d'électricité.

ANNEXE A

DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DE LA TURBINE A GAZ ANSALDO TYPE V94.3A

I. Caractéristiques générales de la turbine à gaz V94.3A.

I.1. Données techniques de la turbine à gaz d'EL HAMMA II

Type: V94.3A	Unité	Charge de Base
Combustible:	—	Gaz naturel
Pouvoir Calorique Inférieur	kJ/kg	44674
Puissance aux bornes alternateur	MW	210400
Consommation spécifique aux bornes alternateur	Kcal/kWh	2373
Débit gaz sortie turbine	kg/s	591.3
Température moyenne gaz sortie turbine	°C	582
Position des ailettes de guidage orientables	%	100
Conditions de référence :		
- Fréquence	s ⁻¹	50
- Température ambiante	°C	30
- Pression ambiante	mbar	1016.1
- Humidité relative	%	70
- Facteur de puissance cos ϕ	-	0.8

Figure I.1 : Tableau illustrant les caractéristiques techniques de la turbine à gaz V94.3A de la centrale d'EL HAMMA II

I.2. Description générale de la turbine à gaz V94.3A de la centrale

d'EL HAMMA II

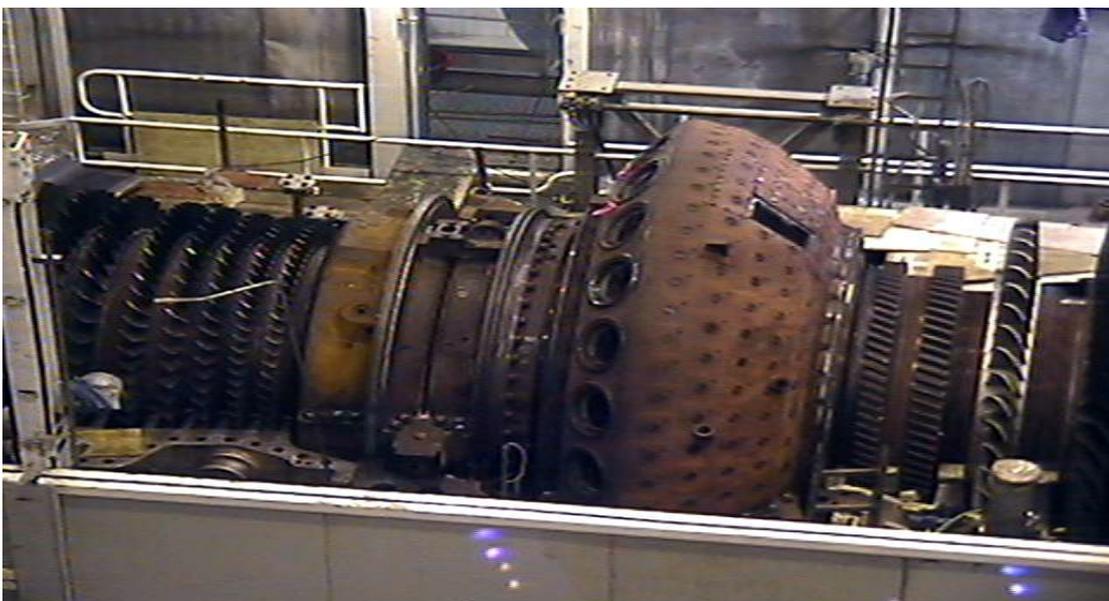
La turbine en exploitation à la centrale de production d'électricité d'EL HAMMA II est une turbine à gaz Siemens V94.3A de type industriel à un seul arbre et un seul corps d'une puissance nominale d'environ 209 MW (voir la figure I.2, I.3). Elles sont aptes à faire fonctionner des générateurs dans des centrales à la charge de base et à charge de crête. On peut utiliser ces turbines dans des cycles simples ou combinés et pour des applications de réchauffage de district. Elles peuvent fonctionner avec des combustibles liquides, tels que les huiles combustibles légères, ou avec des combustibles gazeux ayant des valeurs calorifiques différentes, tel que le gaz naturel. Les avantages majeurs et les caractéristiques de cette turbine à gaz sont les suivantes :

- La combustion a lieu dans une chambre de combustion annulaire dotée de brûleurs hybrides pouvant brûler des combustibles liquides et gazeux.
- Les brûleurs hybrides réduisent les missions de NO en chauffant le gaz ou le fuel dans la plage de charge supérieure en utilisant un procédé sec. En fonction des exigences requises en matière d'émissions.
- La conception de l'ensemble du système de combustion est particulièrement simple, ce qui se traduit par une grande fiabilité.
- Vingt-quatre brûleurs assurant une répartition uniforme de la température des gaz chauds en amont de l'aubage de la turbine.
- Le système de refroidissement par film des deux premiers étages de la turbine est d'une grande efficacité.
- Le rotor qui est extrêmement rigide et léger n'est supporté que par deux paliers implantés en dehors de la zone sous pression, à l'admission du compresseur et à l'échappement de la turbine.
- La construction du rotor assure une marche tranquille dans des conditions de fonctionnement instables, celui-ci est en effet composé de disques ailettés dont les faces comportent des accouplements à dentures auto-centreuses. Les disques sont maintenus ensemble par un seul tirant central.
- La faible inertie thermique du rotor, constitué de disques, offre des possibilités de démarrage et de prise de charge rapides.
- L'alternateur peut être entraîné par le convertisseur de fréquence, qui assure un démarrage rapide et sans trop de contraintes de la turbine. Il n'est pas nécessaire de pousser la combustion comme c'est le cas avec un convertisseur de couple et un moteur de démarrage de puissance relativement faible.
- Les avantages dus à la construction sont maintenus lorsque le groupe est en service car la zone arrière du compresseur et les sections de l'enveloppe interne de la turbine sont suspendues dans une enveloppe interne commune séparée de façon à pouvoir se dilater librement.

- Un diffuseur axial simple permet le trajet direct et sans obstacle des gaz d'échappement vers tout type de chaudière de récupération, l'alternateur étant couplé côté compresseur.
- La conception de type industriel et les particularités de la construction minimisent les coûts de maintenance.
- Toutes les aubes fixes et mobiles de la turbine peuvent, sans exception et si nécessaire, être remplacées individuellement sur le site sans soulever le rotor.



**Figure I.2 : Vue externe de la turbine à gaz V94.3A de la centrale
d'EL HAMMA II**



**Figure I.3 : Vue interne de la turbine à gaz V94.3A de la centrale
d'EL HAMMA II**

II. Principe de fonctionnement

La turbine à gaz est le moteur d'entraînement du générateur. C'est un moteur thermique à flux unique qui fonctionne sur la base d'un cycle typique de Brayton. Elle est essentiellement formée de trois parties principales (voir la figure II.1).

- Le compresseur
- La chambre de combustion avec injecteurs relatifs.
- La turbine.

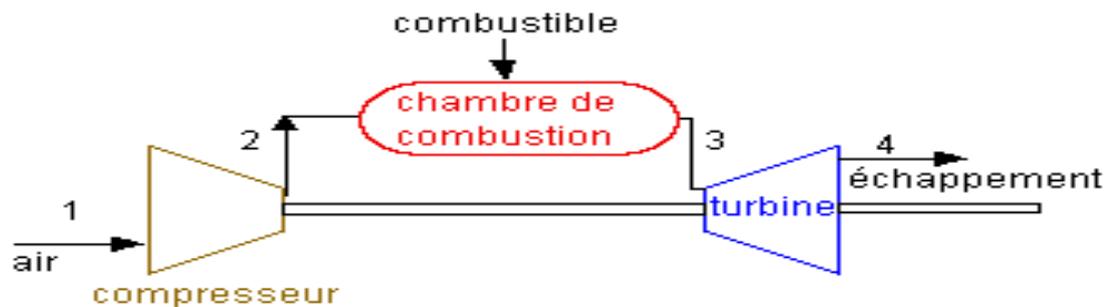


Figure II.1 : Schéma d'un cycle de base d'une turbine à gaz

L'air froid aspiré de l'environnement extérieur au chantier, est comprimé et réchauffé en parallèle en traversant le compresseur. Pour réaliser cette phase il est nécessaire de consommer une certaine quantité d'énergie mécanique en soustrayant de l'énergie de l'élément turbine, transmise à travers le rotor (voir la figure II.2). Il est essentiel que le trajet du parcours du compresseur soit optimisé à obtenir une excellente efficacité globale sans pour autant trop consommer d'énergie. Comme compensation partielle de ce fait, l'énergie employée par le compresseur est ensuite transformée (pour le 99%) en énergie thermique (d'habitude le 1% rentre dans les consommations des pertes mécaniques).

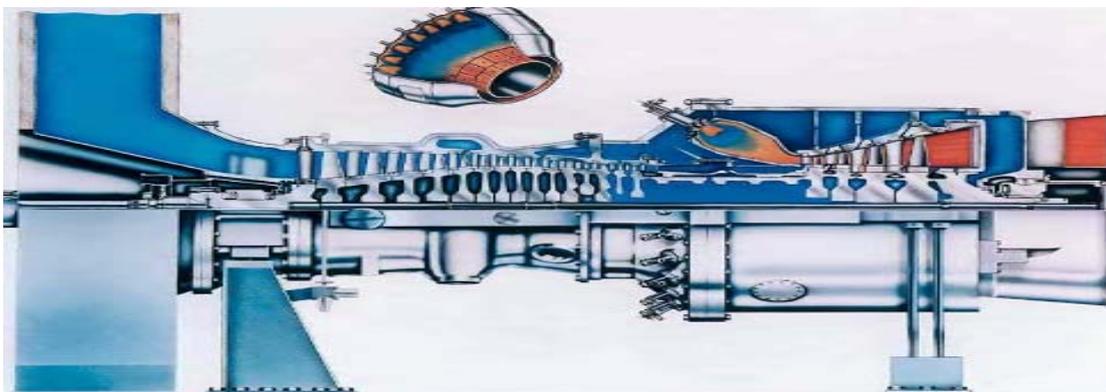


Figure II.2 : Coupe longitudinale de la turbine à gaz V94.3
de la centrale d'EL HAMMA II

A l'intérieur des chambres de combustion, la réaction chimique entre l'air et le carburant produit une importante augmentation de la température à une pression relativement constante. En effet, la chute de pression entre l'évacuation du compresseur et l'admission à la turbine se trouve généralement comprise entre 2 et 2,5% de la pression initiale. Dans cette section le pouvoir calorifique du carburant est transformé en énergie thermique pour les gaz. Etant donné que le rapport de la masse entre l'air et le carburant est bien plus haut que le rapport stœchiométrique, la température finale des gaz ne sera point la température de la flamme (généralement entre 1700°C et 2100°C) mais uniquement fonction de la façon selon laquelle ils brûlent (pré-mélanges ou diffusion). En effet, l'air en excès est mélangé avec l'air de combustion et produit à l'intérieur de la turbine un mélange de gaz homogène dénommé « Température d'admission de la turbine ». Enfin, dans l'élément turbine, les gaz chauds se détendent jusqu'à atteindre la pression ambiante et leur température diminue en conséquence. Cette phase produit une grande quantité d'énergie mécanique, en partie requise par le compresseur, mais surtout reliée à un alternateur transformant l'énergie cinétique (rotation) en énergie électrique. L'énergie électrique à la sortie du générateur est acheminée vers le réseau à travers un disjoncteur groupe, un transformateur principal élévateur (15,75 KV/220 KV) et un sectionneur de ligne.

III. Description détaillée des différents composants de la turbine

III.1. Système de prise d'air pour la turbine d'air

<i>Système de prise d'air</i>	
Caractéristiques nominale	
Débit volume d'admission (aux conditions ISO)	505 m ³ /s
Température	30°C
Humidité relative moyenne	75%
Vitesse maximale du vent	45 m/s
Nombre de préfiltre/filtre à haute efficacité	505 pièces
Pertes de charge finale dans tout le système	1000 Pa
Matériaux	
silencieux	Laine minérale de haute qualité
Gaine	Acier à base de carbone
Caisson des filtres	Acier à base de carbone
Ecran anti oiseaux	Acier inoxydable
Capot	Acier à base de carbone ou Al Mg

Figure III.1 : Tableau illustrant les caractéristiques techniques de la turbine à gaz V94.3 de la centrale d'EL HAMMA II

Le système de prise d'air fournit de l'air filtré au compresseur de la turbine à gaz, en quantité et qualité nécessaire au fonctionnement de cette dernière dans les conditions ambiantes locales (voir la figure III.2). Aux égards des conditions du site, le système sera équipé d'un dispositif de filtration statique multi-étage. A l'admission au compresseur, un silencieux réduit le niveau acoustique à la limite requise. Le système est accessible pour les révisions et les maintenances. Un dispositif de levage est prévu pour le remplacement des éléments filtrants. La durée de fonctionnement des pré-filtres est estimée à quelque 5000 heures et celle des filtres à haute efficacité à quelque 10000 heures.

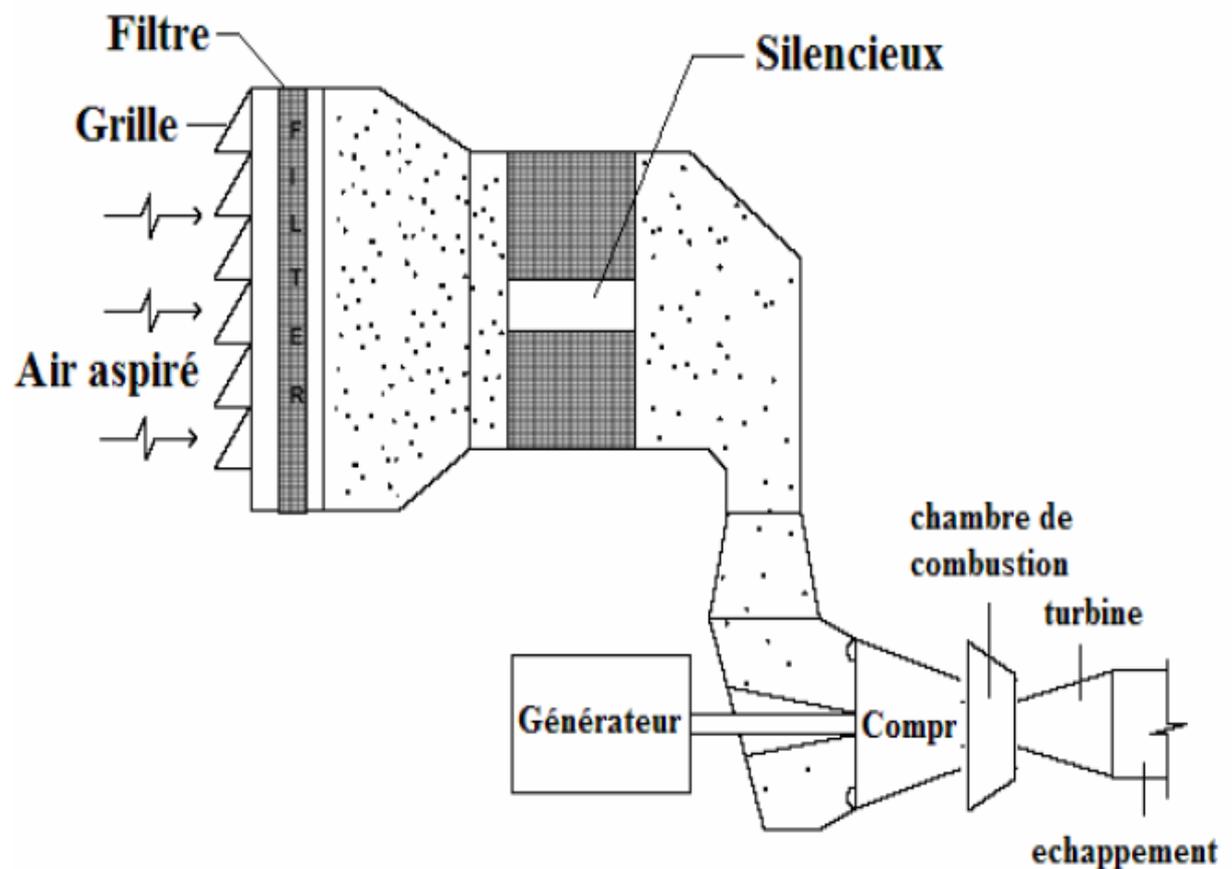


Figure III.2 : Coupe transversale du système de prise d'air de la turbine à gaz V94.3 de la centrale d'EL HAMMA II

III.2. Le compresseur

<i>Compresseur</i>	
Nombre d'étage	17
Nombre d'étage d'aubes directrices à orientation variables IGV	1
Points de soutirage en aval de l'étage des aubes fixes	5
Points de soutirage en aval de l'étage des aubes fixes	10
Points de soutirage en aval de l'étage des aubes mobiles	15
Taux de compression	16 environ

Figure III.3 : Tableau illustrant les caractéristiques techniques du compresseur de la turbine à gaz V94.3 de la centrale d'EL HAMMA II

Le compresseur comporte 17 étages et présente un taux de compression de 16 environ (voir la figure III.4) . L'étage directeur d'entrée à orientation variable permet de maintenir constante la température des gaz d'échappement jusqu'aux alentours de la demi-charge et d'éviter ainsi une baisse sensible du rendement.

Un système anti-pompage soutire une quantité d'air suffisante pour assurer un fonctionnement stable du compresseur à basse vitesse, c'est-à-dire, lors des démarrages et des ralentissements. L'air est soutiré par deux conduites de décharge en aval du cinquième et du dixième étage d'aubes fixes et une conduite en aval du quinzième étage d'aubes mobiles. Il est dirigé vers trois chambres annulaires par des espaces annulaires aménagés à cet effet entre les porte-aubes directrices.



Figure III.4 : Vue interne du compresseur de la turbine à gaz V94.3 de la centrale d'EL HAMMA II

Les conduites de décharges sont dotées de clapets pneumatiques et conduisent l'air soutiré vers le diffuseur d'échappement. De l'air destiné au refroidissement de la turbine est également soutiré au niveau de plusieurs étages du compresseur. Les aubes directrices d'entrées, les aubes directrices des quatre premiers étages et les aubes mobiles des cinq premiers étages du compresseur sont dotées d'un revêtement de Sermetel les protégeant contre les dépôts. La perte de puissance due à l'encrassement des aubes peut être récupérée par un lavage compresseur. La périodicité de nettoyage est déterminée en fonction de la baisse des performances de la turbine. La procédure de nettoyage comprend une période de refroidissement, un lavage avec un produit détergent et un rinçage à l'eau seule.

III.3. La chambre de combustion

<i>Chambre de combustion</i>	
Type	Chambre annulaire
Débit du gaz d'échappement	629 kg/s
Nombre de brûleurs	24
Nombres de dispositifs d'allumage des brûleurs	1
Nombre de transmetteurs de pulsations	8
Émission de NO _x	≤ 25 ppm

Figure III.5 : Tableau illustrant les caractéristiques techniques de la chambre de combustion de turbine à gaz V94.3 de la centrale d'EL HAMMA II

La turbine à gaz est dotée de vingt-quatre brûleurs hybrides répartis régulièrement sur le périmètre de la chambre de combustion annulaire afin d'assurer une zone de température homogène dans la chambre de combustion (voir la figure III.6). Cette conception assure l'écoulement concentrique de l'air entre le compresseur et la chambre de combustion, puis des gaz entre la chambre de combustion et la turbine, ce qui se traduit par une perte de charge minimale. La chambre de combustion comporte des brûleurs hybrides pour un fonctionnement double combustible. Tous les brûleurs sont des ensembles identiques constitués de plusieurs injecteurs. Ces brûleurs hybrides (brevet SIEMENS obtenu en 1986) permettent de réduire les NO par un procédé sec tout en maintenant les émissions de CO à un niveau minimal.

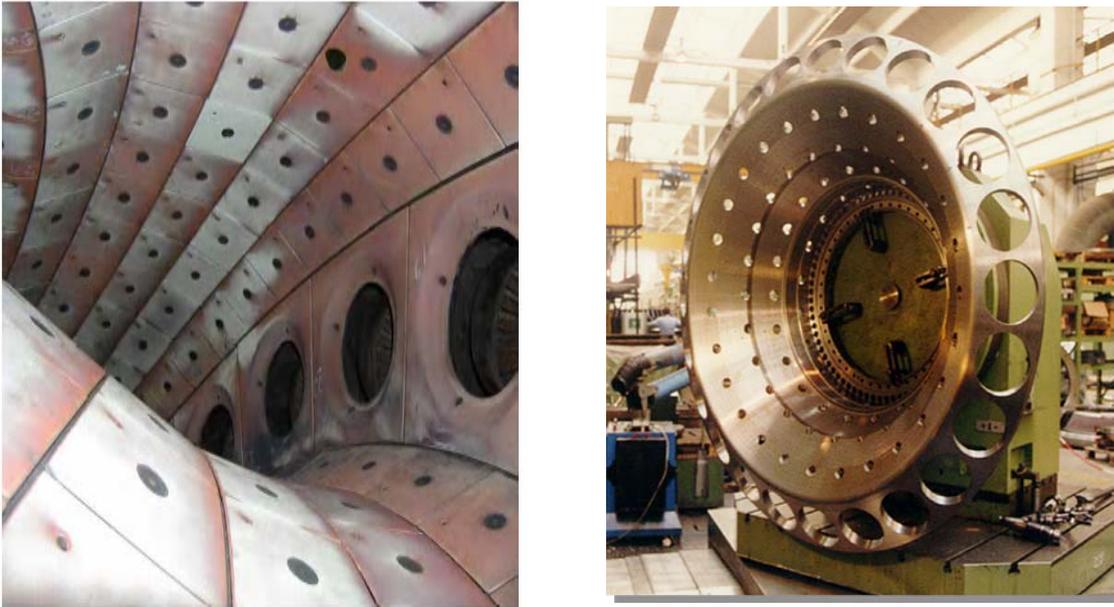


Figure III.6 : Vue interne et externe de la chambre de combustion de la turbine à gaz V94.3 de la centrale d'EL HAMMA II

Ils fonctionnent à cet effet en mode pré-mélange dans la plage de charge supérieure. En mode diffusion, le combustible est brûlé pendant qu'il est mélangé à l'air comburant. En mode pré-mélange, par contre, le combustible est à l'air dans l'injecteur à pré-mélange avant d'être brûlé.

III.4. Les brûleurs hybrides SIEMENS

Un brûleur à gaz est, par définition, un organe destiné à mettre en présence le combustible et le comburant et cela dans proportions permettant une combustion dont les caractéristiques conviennent pour l'opération à réaliser (voir la figure III.7).

Les fonctions d'un brûleur ont pour but de :

- Permettre le réglage des débits d'air et de gaz.
- Réaliser le mélange de l'air et du gaz.
- Assurer le maintien du rapport air/ gaz à la valeur voulue, dans les limites de débits imposées par l'opération à effectuer.
- Maintenir la stabilité de la flamme aux différentes allures.
- Donner à la flamme des dimensions appropriées à celle de l'enceinte où doit s'effectuer la combustion.
- Eventuellement donner à la flamme un pouvoir émissif suffisant.



Figure III.7 : Les brûleurs hybrides Simens de la chambre de combustion de la turbine à gaz V94.3A de la centrale d'El HAMMA II

Le comburant est le plus souvent de l'air, dans certaines installations c'est de l'air préchauffé, de l'air suroxygéné ou même de l'oxygène pur. Les brûleurs qui fonctionnent avec plusieurs natures de gaz sont dits « multi-gaz » ou éventuellement « tout gaz » (omni-gaz). Ceux qui peuvent fonctionner avec plusieurs combustibles sont dits « hybrides », « mixtes » ou « multi-combustibles », le plus souvent, le second combustible est liquide, il s'agit généralement du fuel-oil. Si le gaz et l'autre combustible peuvent brûler en même temps, le brûleur est à marche simultanée aux deux combustibles, sinon il est à marche alternée. Plus simplement, il est d'usage de parler de brûleurs mixtes simultanés et de brûleurs mixtes alternés. Certains brûleurs sont alimentés séparément en comburant et en gaz jusqu'à la flamme, d'autres sont alimentés par mélange préalable d'air et de gaz. Dans ce second cas, le mélange est réalisé dans un organe appelé « mélangeur ». il est souvent incorporé au brûleur. Ce n'est toutefois pas toujours le cas et un mélangeur peut même être commun à un groupe de brûleurs.

Il a été dit plus haut que les caractéristiques des flammes devraient être appropriées aux utilisations. On peut donc imaginer une infinité de brûleurs donnant des flammes différentes. En pratique, malgré la multicités des usages, il est possible de grouper les brûleurs en un nombre limité de groupes déterminés qui présentent des propriétés bien définies. Suivant la classification des flammes, selon le mode de

mélange du combustible et de l'air et d'après la nature du combustible, nous distinguons dans un brûleur les modes d'injection de gaz suivants :

a) Marche au combustible gazeux (gaz naturel)

- Mode de « DIFFUSION » : le gaz combustible arrivant par la tuyauterie d'alimentation en gaz de diffusion entre le turbulateur ou swirler (voir figure **III.8**) axial des injecteurs de gaz de diffusion et est injecté directement dans la chambre de combustion.
- Mode « PREMELANGE » : le gaz combustible passe par les injecteurs situés au dessus du turbulateur (voir figure **III.8**) diagonal et se mélange à l'air sur son trajet vers la chambre de combustion.

De plus, du gaz combustible est envoyé vers l'injecteur pilote (gaz-pilote) afin de stabiliser la flamme. Ce mode d'injection gaz-pilote comme il est illustré sur les figures et a été remarqué dans des turbines SIEMENS et nous l'avons remarqué sur la turbine à gaz **V94.3A** d'El HAMMA II.

b) Marche au combustible liquide (gas-oil)

- Mode de « DIFFUSION » : en premier temps, et au cours de démarrage, l'allumage se fait au gaz propane. Et dans un second temps, les brûleurs hybrides, toujours en mode diffusion, vaporisent le gas-oil de façon à ce qu'il puisse s'enflammer complètement dans la chambre de combustion. Une partie du gas-oil est injectée directement dans la chambre de combustion par l'injecteur de gas-oil (ou fuel-oil) central et le reste s'écoule dans la tuyauterie de retour du gas-oil (voir la figure **III.8**).
- Mode de « MREMELANGE » : le gas-oil est atomisé par de nombreux petits injecteurs situés dans le canal d'air primaire du brûleur, en aval du turbulateur (voir figure **III.8**) diagonal, il se mélange ainsi avec l'air avant de pénétrer dans la chambre de combustion.

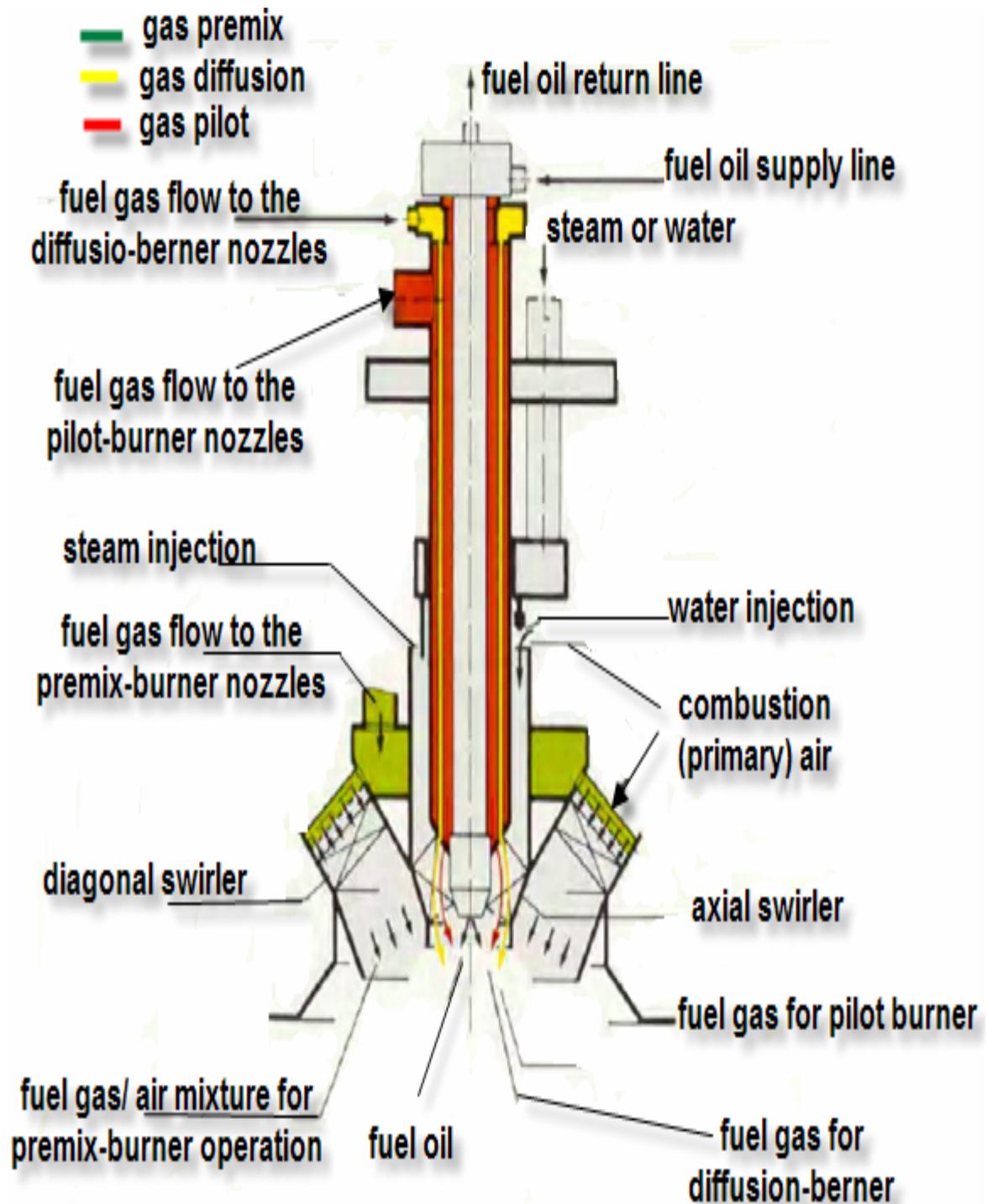


Figure III.8: Les différents modes d'injection d'un brûleur hybride Siemens de la turbine à gaz V94.1A de la centrale d'El HAMMA II

III.5. La turbine

<i>Turbine</i>	
Nombre d'étages	4
Débit des gaz d'échappement	629 kg/s
Température à l'entrée de la turbine	Environ 1190°C
Température des gaz d'échappement	Environ 571 °C

Figure III.9 : Tableau illustrant les caractéristiques de la turbine de la centrale d'EL HAMMA II.

Les gaz chauds issus de la chambre de combustion se détendent dans une turbine à quatre étages. Les aubes mobiles de la turbine sont constituées d'une pale, d'un bandage intérieur et du pied. La cambrure de la pale permet de prendre en compte les différentes vitesses périphériques entre le pied et le sommet d'aube (voir la figure III.10, III.11). Le pied de l'aube en forme de sapin est doté de deux ou trois dents. Les aubes sont insérées dans les rainures des disques et sont maintenues en position axiale par des clavettes.



Figure III.10 : Vue interne du rotor de la turbine à gaz V94.3A de la centrale d'El HAMMA II

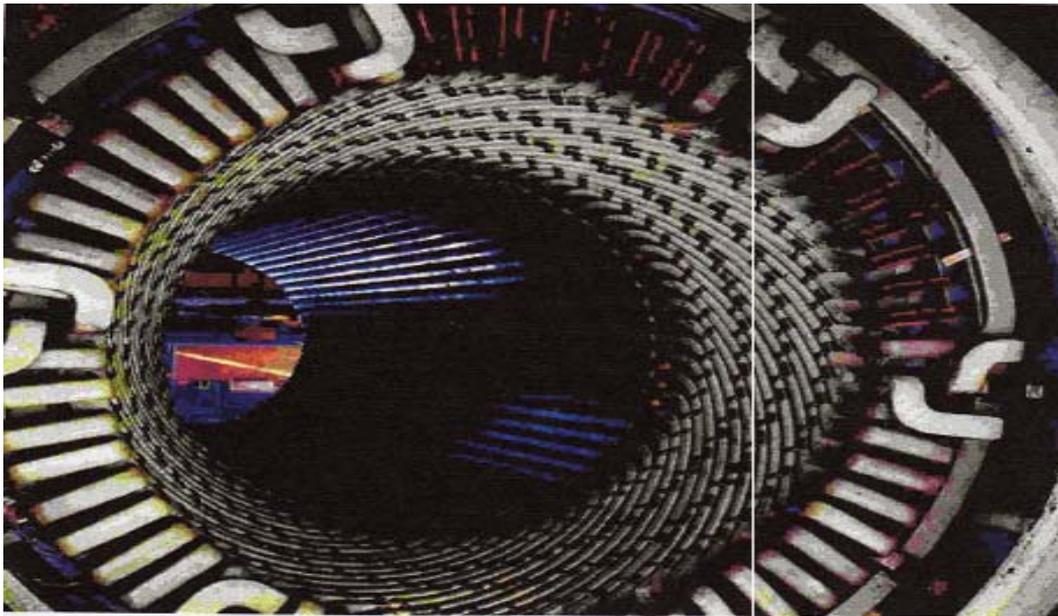


Figure III.11 : Vue interne du stator de la turbine à gaz V94.3A de la centrale d'El HAMMA II

En raison des importantes contraintes thermiques et mécaniques auxquelles elles sont soumises, les aubes de la turbine sont réalisées à partir d'alliages résistant aux hautes températures (voir la figure III.12). Les aubes des trois premiers étages sont dotées d'un revêtement de protection contre la corrosion à hautes températures. Les aubes fixes sont constituées de deux couches, extérieur et intérieur. La couche extérieur sert à maintenir l'aube dans le porte-aubes et constitue l'enveloppe extérieure de la veine des gaz chauds. La couche intérieure compte la veine des gaz chauds vers l'intérieur et supporte l'étanchéité interne.



Figure III.12 : Les aubes fixes et mobiles de la turbine à gaz V94.3A de la centrale d'EL HAMMA II

Les quatre étages d'aubes fixes et les trois premiers d'aubes mobiles sont refroidis à l'air. L'air de refroidissement destiné à la turbine est prélevé aux étages appropriés du compresseur. Les aubes sont refroidies par film, par impact ou par convection, selon les étages de la turbine.

III.6.Système de refroidissement de la turbine

Le système de refroidissement de la turbine refroidit le rotor et l'aubage de la turbine sans faire appel à un système de refroidissement externe. L'aubage de la turbine doit être refroidi afin d'éviter un dépassement des températures admissibles des matériaux. Le refroidissement des pièces situées dans la veine des gaz chauds améliore la fiabilité en service, protège ces pièces des échauffements excessifs et améliore leur résistance à la corrosion aux hautes températures.

Grâce à l'air de refroidissement qui l'entoure de toutes parts, le rotor n'est pas soumis aux pointes de contraintes thermiques qui pourraient provoquer sa déformation lors des variations de charge dues aux démarrages rapides. Le fait de refroidir le rotor de la turbine avec de l'air venant du compresseur permet également de réchauffer les disques de la turbine après un démarrage de l'état froid. Cela réduit les tensions dans les disques et raccourcit le temps nécessaire à l'orientation des jeux qui s'établissent en régime permanent.

Les différents étages de la turbine nécessitent de l'air de refroidissement à des pressions différentes. A cet effet, l'air de refroidissement est extrait du compresseur en différents points :

➤ Etage 1

L'air de refroidissement destiné au premier étage de la turbine est soutiré à l'échappement du compresseur.

➤ Etage 2

L'air de refroidissement destiné au deuxième étage d'aubes fixes de la turbine est soutiré du quinzième étage du compresseur. Des conduites dirigent l'air du compresseur à l'enveloppe de la turbine. De là, il pénètre dans les aubes directrices par des orifices percés dans le port d'aubes.

Les aubes mobiles sont refroidies par de l'air soutiré en aval du quatorzième étage du compresseur. Cet air pénètre dans les pieds des aubes par des orifices percés dans les disques du rotor et dans le tube répartiteur d'air puis ressort par le sommet des pales.

➤ Etage 3

Les aubes du troisième étage sont refroidies de la même manière que celles du deuxième étage. Pour le refroidissement des aubes fixes, deux conduites amènent l'air soutiré du dixième étage du compresseur à l'enveloppe de la turbine.

L'air destiné aux aubes mobiles est soutiré du quatorzième étage du compresseur.

➤ **Etage 4**

Une simple conduite amène l'air soutiré du cinquième étage du compresseur à l'enveloppent de la turbine. De là, il parvient aux aubes fixes de la turbine de la même façon que pour les étages deux et trois.

Au quatrième étage, seul le pied des aubes mobiles est refroidi par de l'air venant du quatorzième étage du compresseur.

ANNEXE B

DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DE L'ALTERNATEUR ANSALDO TYPE 50THR-L45

I. Caractéristiques générales de l'alternateur 50 THR-L45

I.1. Données techniques de l'alternateur 50 THR-L45

Fabricant	-	ANSALDO
Type	-	50THR-L45
Nombre d'identification	-	
Type de turbine couplée	-	A gaz V94.3A
Sens de rotation (coté turbine)	-	Horaire
Puissance nominale	MVA	270
Tension nominale	kV	15.75
Factor de puissance nominale	-	0.8
Frequence nominale	Hz	50
Plage de variation de tension	(*) %	± 7.5 (Exc. ± 10)
Plage de variation de frequence	(*) %	± 4 (Exc. -8 ÷ +6)
Courant nominale	A	9897
Vitesse nominale/survitesse (essai pendant 2 minutes)	rpm	3000 / 3600
Nombre et couplage des phases	- / -	3 / Y
Normes de reference	-	C.E.I.
Type de système d'excitation	-	STATIQUE
Courant d'excitation à puissance nominale	A	2700
Tension d'excitation à puissance nominale a 120°C	V	343
Classe d'isolation du stator / rotor	-	F / F
Type de refroidissement enroulement stator	-	Indirect
Type de refroidissement enroulement rotor	-	Direct
Pression de l'hydrogène nominale / maximal (abs.)	kPa	400 / 400
Temperature de l'hydrogène de refroidissement	°C	40
Témpérature enroulement stator (par RTD)	°C	108
Témpérature enroulement rotor (par resistance)	°C	120
Courant inverse maximale en regime permanent	(I ₂) %	8
Courant inverse maximale en regime transitoire	(I ₂ ² t) s	8
Degre de protection (code IP)	-	IP 55
Modes de refroidissement (code IC)	-	IC 8 (H1) W7
Forme de construction (code IM)	-	IM 1105
Degre de sismicité (d'après le RPA 88)	-	Zone II - Groupe I
Niveau d'installation	m s.l.m.	s.l.m.
Niveau de bruit	dB(A)	85 à 1 m
Moment d'inertie (WR ²)	kg m ²	6500

Figure I.1 : Tableau illustrant les caractéristiques techniques de l'alternateur 50 THR-L45 de la centrale d'EL HAMMA II

I.2. Description générale de l'alternateur ANSALDO type 50 THR-L45

Les alternateurs de la centrale d'EL HAMMA II sont du type **50THR – L45**, à pôles lisses avec enroulement triphasé au stator, et excitation au rotor (voir la figure I.2)



Figure I.2 : vue externe de l'alternateur 50 THR-L45 de la centrale d'EL HAMMA II

L'alternateur élémentaire comporte essentiellement deux enroulements

- l'enroulement induit dit statorique
- l'enroulement inducteur dit rotorique

a) L'enroulement induit

Le stator est constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Le stator de l'alternateur **ANSALDO type 50 THR-L45** est composé de :

- Carcasse cylindrique
- Bobinage
- Circuit magnétique
- Réfrigérants d'hydrogène
- Bornes de sortie
- Flasques paliers

➤ **La carcasse**

La carcasse est réalisée en solides tôles soudées. Elle est fondamentalement un cylindre, renforcé par des nervures annulaires et parois, fermée aux extrémités par des extensions réalisées de façon analogue au corps cylindrique servant aussi à soutenir les flasques paliers. La carcasse doit contenir l'hydrogène à la pression d'exercice et résister à des éventuelles surpressions dérivant de possibles explosions internes dues au mélange accidentel hydrogène eau.

Les flasques sont fixés à la carcasse par des brides boulonnées. Les parois internes de la carcasse sont coupées de façon spéciale pour créer les passages du gaz réfrigérant. Les quatre réfrigérants d'hydrogène sont disposés verticalement aux quatre coins de la carcasse.

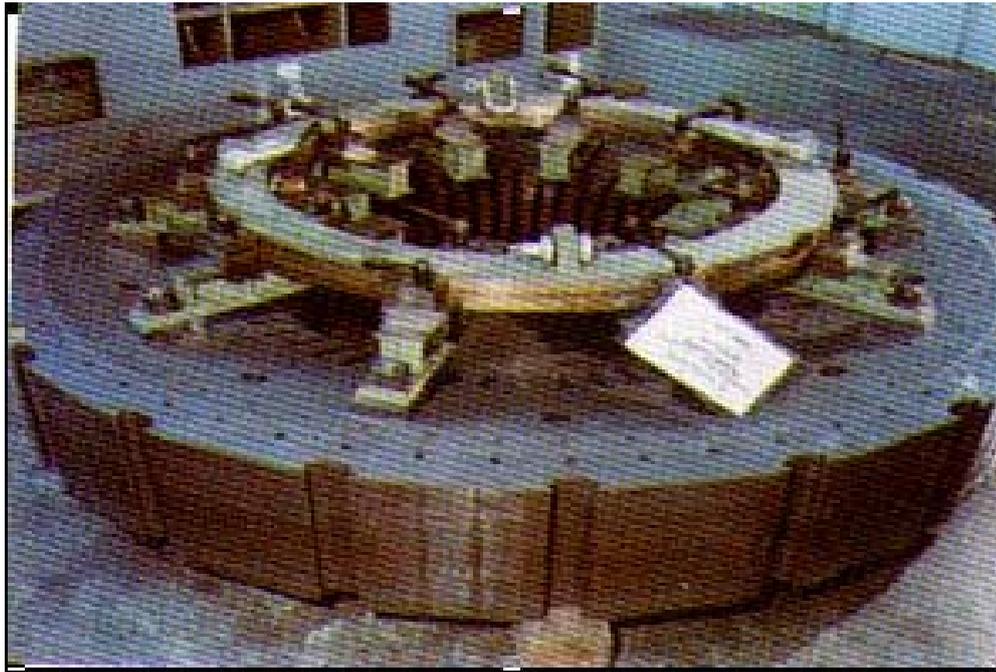
Les pieds et les semelles d'appui sont soudés à la carcasse et permettent l'assemblage de la machine au plan d'appui sur les plaques d'assise.

Les tôles des paquets d'extrémités sont collées entre elles pour éviter les vibrations de chaque tôle.

Le noyau est uni par des tirants disposés sur les extrémités du circuit magnétique de sorte à permettre une suspension élastique minimisant le transfert des vibrations engendrées par le noyau statorique, pendant le fonctionnement, à la carcasse et aux fondations.

➤ **Noyau magnétique**

Le noyau statorique est réalisé en tôles magnétiques empilées à pertes réduites et de perméabilité élevée. L'utilisation de cette tôle permet en particulier d'accroître très sensiblement l'induction dans la couronne statorique, ce qui procure un avantage appréciable quant aux dimensions et au poids. Le noyau est parcouru par un flux alternatif. Pour éviter les pertes par courant de Foucault, il doit obligatoirement être feuilleté. Le plan des tôles est parallèle à la direction du flux.



**Figure I.3 : Vue interne du noyau magnétique de l'alternateur
50 THR-L45 de la centrale d'EL HAMMA II**

➤ **Le bobinage**

L'enroulement du stator est du type triphasé imbriqué. Les barres sont constituées de conducteurs élémentaires en cuivre, à double couche d'isolation. L'ensemble des conducteurs forme des barres. L'isolation principale contre la masse de l'enroulement est constituée en papier de **MICA** soutenu par une bande de fibre de verre. Les barres sont bloquées mécaniquement dans les encoches et connectées entre elles suivant le type de bobinage. Certaines encoches contiennent des détecteurs (**RTD**) servant à transmettre la température des enroulements au système contrôle-commande.

➤ **Les bornes**

Les bornes du générateur sont du type à traversée, elles sont disposées trois dans la partie supérieure de la carcasse et trois dans la partie inférieure, les six du côté opposé à l'accouplement avec la turbine. Cette morphologie de construction permet d'installer le générateur sur fondations conventionnelles en béton typique où les bornes de ligne sont placées dans la partie haute de la carcasse et les bornes de neutre dans la partie basse.

b) L'enroulement inducteur

➤ **Corps du rotor**

Le corps rotor est tiré d'une seule pièce de Fer forgé, pour élever sa perméabilité magnétique. Les encoches axiales pour le logement de l'enroulement sont tirées par fraisage. Les rainures transversales sont réalisées dans les zones polaires pour uniformiser les moments d'inertie. Le courant d'excitation est amené aux bornes de l'enroulement rotor avec des connexions axiales logées dans l'alésage central du coté opposé d'accouplement, la liaison entre ces connexions et les bornes de l'enroulement se fait par des liaisons radiales placée sous les têtes rotoriques.

➤ **Enroulement amortisseur**

L'enroulement amortisseur a les fonctions suivantes :

- Amortir les oscillations du rotor à la suite de soudaines variations de la charge.
- Protéger le rotor d'excessifs chauffages superficiels dus au courant circulant en surface a la suite de fonctionnements à charge déséquilibrée. Pour atteindre ces objectifs, l'enroulement amortisseur doit former une cage a conductibilité élevée en recouvrant le plus possible la surface rotorique.

➤ **Connexion à l'enroulement**

Le courant d'excitation est amené par les bagues collectrices à l'enroulement rotor avec deux connexions liées à l'enroulement au moyen de liaisons radiales. Les connexions sont réalisées en barres en cuivre semi circulaires placé dans l'alésage central du rotor, coté excitation.

➤ **Ventilateur**

Les deux ventilateurs de type axial activent la circulation du fluide de refroidissement avec une série d'aube en aluminium boulonnées sur un anneau en acier placé à chacune des deux extrémités de l'arbre rotorique. Les anneaux sont emmanchés sur l'arbre rotorique.

➤ **Paliers**

Le rotor est soutenu par deux paliers montés sur les flasques frontaux. Le palier coté excitation est isolé par un système à double isolation pour éviter la circulation de courant d'arbre et permettre le contrôle de l'isolation même. L'arbre rotorique est mis à la terre, coté accouplement avec des tresse en cuivre.

➤ **Bague collectrice et balais**

L'alimentation en courant continu des pôles inducteurs tournants à partir d'une source extérieure s'effectue par l'intermédiaire de deux balais fixes appuyant sur deux bagues montées sur l'arbre et reliées à l'enroulement rotorique. Les conducteurs de connexion entre les bagues et l'enroulement, sont placés à l'intérieur du trou axial de l'arbre qui est foré sur toute la longueur du rotor. Pour des raisons de sécurité et d'accès, les bagues sont généralement placées du coté opposé à la turbine.

II. Exploitation et fonctionnement de l'alternateur 50 THR-L45

II.1. Démarrage et arrêt

II.1.1. Contrôle avant le démarrage

Si l'alternateur a été précédemment arrêté après son travail normal pour une période de temps ne dépassant pas les quelques mois, dans ces conditions il faut :

- S'assurer du service correct du système de graissage des paliers, en contrôlant tous particulièrement : la pression, la circulation, la température et le niveau de l'huile de graissage dans les paliers et dans les supports.
- S'assurer que le système d'excitation est sous tension.
- S'assurer que la protection, la surveillance et le contrôle à distance ainsi que les systèmes de mesure sont en exercice et prêts à se déclencher.
- S'assurer de la fonctionnalité correcte du système de ventilation de démarrage et d'excitation.

II.1.2. Démarrage

Le démarrage devrait se faire à vide c'est-à-dire sans charge électrique extérieure raccordée à l'alternateur. Pendant le démarrage un contrôle doit être fait :

- La température des paliers de l'alternateur ainsi que la pression, température de l'huile de graissage pour les paliers, demeure entre des limites bien déterminées. En cas d'irrégularités dans la température des paliers ou des pannes du système de graissage. Le démarrage (ou la marche) sera immédiatement arrêtée pour permettre l'identification et l'élimination de la cause de la panne, avec une possible inspection des paliers et des tests fonctionnels sur les systèmes de graissage.
- Les vibrations mécaniques des paliers ne doivent pas excéder à des limites bien déterminées de l'alternateur, en cas de vibration mécanique excessives, il est conseillé d'interrompre le démarrage (ou la marche) en identifiant et en éliminant les causes avant de faire redémarrer l'alternateur.
- Le bruit de l'alternateur ainsi que celui de ses parties doivent être tout à fait normal
- Le démarrage se termine lorsque la vitesse atteinte avoisine la vitesse nominale.

II.1.3. Excitation à vide

L'excitation de l'alternateur se développe graduellement après avoir atteint une vitesse très proche de la valeur nominale. Lors de l'excitation à vide il est nécessaire de veiller à ce que :

- La tension de l'alternateur (tension /fréquence relative) ne devra pas excéder le taux de valeur nominale.
- La tension à vide ne doit jamais excéder (sauf en cas de brèves périodes de temps) la valeur maximale de la tension nominale.

II.1.4. Synchronisation

La tension et la fréquence du système à raccorder à l'alternateur seront comparables à la gamme de tension et fréquence permises par la marche de l'alternateur. L'extension des endommagements dépend des conditions existantes au moment de la synchronisation. Il est souvent difficile de se rappeler rétrospectivement des conditions au moment d'une synchronisation incorrecte et ceci démontre encore une fois l'attention avec laquelle on doit exécuter cette opération.

L'alternateur peut redémarrer seulement lorsqu'on a connaissance des résultats des inspections et des vérifications. En effet, un couplage correct de l'alternateur avec le réseau ne peut être exécuté que lorsque :

- Le déphasage entre la tension alternateur et la tension réseau est minimum
- La différence entre la fréquence alternateur et celle du réseau soit inférieure à 0,5HZ.
- L'ordre de phase au moment du couplage est respecté.

II.1.5- Chargement

Après la synchronisation, les deux composantes de la charge électrique (puissance active et puissance réactive) peuvent être ajustées.

- La puissance active est réglée sur la force motrice (turbine à gaz)
- La puissance réactive est réglée en maniant l'excitation, c'est-à-dire le régulateur de tension.

Au cours de l'exercice de chargement, en plus de ce qui a déjà été mentionné à propos du démarrage, on doit vérifier que :

- La température de l'air de refroidissement tombe dans les limites recommandées.
- Les surcharges de température sur les bobinages du rotor et du stator se maintiennent dans les limites consenties par rapport à l'air de refroidissement.

II.1.6. Arrêt

Pour arrêter l'alternateur il faut :

- Réduire graduellement la puissance active en agissant sur la force motrice, et la puissance réactive en agissant sur l'excitation.
- Ouvrir le disjoncteur groupe et donner l'ordre d'arrêt pour le système d'excitation et de la régulation de la turbine.
- L'alternateur peut être arrêté par un dispositif automatique déclenché par le système de protection de l'installation ou par l'opérateur (arrêt de secours). Dans ce cas, la charge est coupée à l'improviste causant de la sur vitesse et du survoltage à l'alternateur, lesquels seront maintenus entre des limites bien déterminées et seront considérés comme transitoires.

II.2. Le refroidissement

L'alternateur est le siège de pertes importantes parmi lesquelles On distingue :

- les pertes par effet joule
- les pertes par courant de Foucault
- les pertes par hystérésis
- les pertes par frottement de l'arbre dans ses paliers

Les pertes produites dans les parties actives pendant le fonctionnement du générateur sont emportées par la circulation d'hydrogène sous pression qui à son tour cède la chaleur aux réfrigérants (échangeur hydrogène –eau).

L'enroulement rotoriques est refroidi par hydrogène en contact direct avec le cuivre, alors que les pertes de l'enroulement statorique sont emportées indirectement. Le cuivre cède la chaleur à travers l'isolation au paquet statorique, ensuite au fluide réfrigérant parcourant les canaux radiaux placés parmi les paquets de tôles et disposés sur toute la longueur de la machine, ainsi la température des gaz froids peut être contrôlé en réglant le circuit eau alimentant les réfrigérants d'hydrogène. Le fluide réfrigérant circule dans le générateur avec deux ventilateurs axiaux mis en rotation par le rotor même

La configuration générale du refroidissement est symétrique par rapport au centre de la machine, et prévoit la création de différents parcours pour le gaz refroidi, chacun de ces parcours est en outre constitué de nombreux flux.

Ainsi une première partie du gaz réfrigérant entre dans le rotor, dans la zone des têtes rotoriques par l'espace entre le blindage et l'arbre ,et sous les frettes de blindage, une deuxième partie du gaz entre dans des spéciaux trous ouverts dans les enroulement dans l'entrefer des deux extrémités de la machine, et la partie restante du gaz réfrigérant arrive directement aux conducteurs des tôles statorique et les parties terminales du noyau avant d'être acheminée à la partie externe du circuit magnétique.

II.2.1- Les avantages du refroidissement par hydrogène

L'emploi de l'hydrogène comme fluide réfrigèrent présente, par rapport à l'aire, les avantages suivants :

- Une densité 14 fois plus faible, d'où la réduction des pertes par ventilation dans le même rapport ; en effet, les pertes par ventilation sont proportionnelles à la densité du gaz.
- Un coefficient de conductibilité thermique 7fois plus élevé et un coefficient de convection 1,35 fois plus grand permettant de réaliser des machines plus petites pour la même puissance et le même échauffement et par conséquent, d'atteindre une puissance limite plus élevée.
- Diminution du frais d'entretien par suite de l'absence de poussières et d'humidités.
- Risque moindre de détérioration des isolants sous l'action des effluves et de la chaleur en raison de l'absence d'oxygène et d'humidité.
- Diminution de bruit due à la faible densité de l'hydrogène et au fonctionnement en circuit fermé.

BIBLIOGRAPHIE

Document

- [1] André Bonnet, « Redressement commandé ».
- [2] Anthony Giampaolo, « Gas turbine handbook.principles and practices », ed: The fairment press, 2006.
- [3] B.Saint-jean, « Electrotechnique et machines électriques », ed : eyrolles, 1977.
- [4] Chee-Mun Ong, « Dynamic simulation of electric machinery using matlab », ed: prentice hall ptr.Perdue university, West Lafayette, Indiana.
- [5] Christophe François, « Génie électrique. Cours complet et illustré », ed : Ellipses, 2004.
- [6] Claude Divoux, « Redressement commandé », Mai 2000.
- [7] Didier le Ruyet, « Bases scientifiques (Lois physiques pour l'électronique l'électrotechnique, l'automatisme) », 2003.
- [8] Françoise Rojare, « Electronique de puissance », ed: Ediscience international, 1989.
- [9] G. CHAGNON, « Cours de Génie Electrique », Licence Professionnelle de Génie Industriel. Université Paris VI-Jussieu , CFA Mecaveni,. 2001-2002.
- [10] G. Pinson, « Convertisseurs alternatif-continu ».
- [11] Gilbert Ruelle, « Turboalternateurs », Technique de l'ingénieur.
- [12] H. Cohen et G.F.C Rogers, « Gas turbine theory », ed : Longman Scientific and technical, 1987.
- [13] J.H. Horlock, « Advanced gas turbine cycles », ed: An imprint of elsevier science, 2003.
- [14] J.m.Roussel, « Eléments constitutifs et synthèse des convertisseurs statiques ».
- [15] J.Ney, « Electricité », ed : Dunod, 1962.
- [16] Lieby Frederic, « Electrotechnique analytique. Machine synchrone », 2002.
- [17] M.Bellier et A.Galichon, «Machines électriques », ed : Delagrave, 1972.
- [19] Philippe Ladoux, « Variation de vitesse des machines à courant alternatif ».
- [18] Meherwan P.Boyce, « Gas turbine engineering handbook », Ed: Gulf professional publishing, 2002.
- [20] P.P. Walsh et P. Fletcher, « Gas turbine performance », ed: Blackwell Science, 2004.

- [21] Pierre Wetzer, « Machines synchrones : Excitation ».
- [22] Rolf Kehlhofer, « Combined-cycle gas and steam turbine power plants»,
Ed: PennWell, 1997.
- [23] SIEMENS Power Generation, Inc, « Fonctionnement de l'alternateur », 2006.
- [24] Théodore Wildi et Gilbert Sybille, « Electrotechnique », ed : De boeck, 4^{ème} édition,
2005.

Document sans nom d'auteur

- [25] « Puissance dans les circuits alternatifs », ed : Dunanche, décembre 2000
- [26] « Production d'énergie électrique dans une centrale ».
- [27] « Energie et convertisseur d'énergie », université de Savoie, chap2 : interrupteurs semi-conducteurs de puissance.
- [28] « Energie et convertisseur d'énergie », université de Savoie, chap3 : les redresseurs.
- [29] « Convertisseur statique d'énergie électrique ».
- [30] « Les redresseurs ».
- [31] « Les machines synchrones. Technologies et différents modes d'alimentations des machines synchrones ».
- [32] « Les composants de l'électronique de puissance ». YC/RN-ENPU1
- [33] « Conversion d'énergie de type alternatif/continu ». YC/RN-ENPU1

Lien

- [34] <http://www.wikipédia.com>
- [35] <http://www.mediatic.com>
- [36] <http://www.assocampus.com>
- [37] <http://www.wikiverisité.fr>
- [38] <http://www.techno-science.net>
- [39] <http://www.E-lektronik.com>.

Thèse de doctorat

- [40] De Bernardinis Alexandre, « Etude et optimisation d'un ensemble alternateur-redresseur commandé, application a un véhicule hybride », école polytechnique de l'université de Nantes, 2000.

- [41] Birame M'hamed, « Commande floue d'un convertisseur AC-DC à UPF en cascade avec un convertisseur DC-DC double étage alimentant un système de biberonnage par supercapacités d'un véhicule électrique », université de Batna, 2003.
- [42] Hervé Feral, « Modélisation des couplages électro-thermo-fluidiques des composants en boîtier press-pack, application à l'integrated gate commutted thyristor 4,5KV – 4KA », institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [43] Nicolas Roux, « Nouveaux mécanismes de commutation exploitant les protections intégrées des semi-conducteurs de puissance, application à la conception de convertisseurs statiques à commutation automatique », institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [44] Pierre Brosselard, « Conception, réalisation et caractérisation d'interrupteurs (thyristors et JFETs) haute tension (5KV) en carbure de silicium », institut national des sciences appliquées de Lyon, 2004.
- [45] Pierre Lefranc, « Etude, conception et réalisation de circuits de commande d'IGBT de forte puissance », institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.

Mémoire d'ingénieur

- [46] Arezki Chami, Mohamed Gouffi et Achour Messaoudi, « Etude et réalisation d'un pont redresseur triphasé tout thyristors », université de Mouloud Mammeri, 1997.
- [47] Nedjari Hassane et Khabet Madjid, « Etude et réalisation d'un redresseur triphasé à point neutre à thyristor G.T.O », université de Mouloud Mammeri, 1998.