

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Machines électriques**

*Présenté par*

**Mustapha LABBACI**

**Samir MEZIANE**

Thème

## **Modélisation et simulation d'un ensemble turbine-alternateur en mode isochrone.**

*Mémoire soutenu publiquement le 30/09/2015 devant le jury composé de :*

**Mr Mustapha BOUHRAOUA**

MCA, UMMTO, Président

**Mr Nacereddine BENAMROUCHE**

Professeur, UMMTO, Encadreur

**Mr Lyes ABBASSEN**

Doctorant, SONATRACH, Co-Encadreur

**Mr Mustapha ZAOUIA**

MCA, UMMTO, Examineur

**Mr Hakim DENOUN**

MCA, UMMTO, Examineur

## **REMERCIEMENT.**

*Cette thèse doit beaucoup aux personnes qui ont accepté de nous encadrer, à ceux qui ont accepté de diriger ce travail, qui nous ont soutenu et encouragé. On tient à remercier tout particulièrement notre encadreur, Monsieur **N.BENAMROUCHE** Professeur à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et Monsieur **L.ABBASSEN** Co-encadreur, ingénieur, pour leur soutien sans faille, la confiance qu'ils nous ont témoignée, ainsi que pour nous avoir fait bénéficier de leurs compétences scientifiques, leur disponibilité et leurs encouragements ont été déterminants dans la progression de ce travail et nous ont permis de le mener à bien*

*J'adresse mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce mémoire en lui apportant de l'intérêt, à Monsieur **M.BOUHRAOUA**, président de jury, MCA à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Monsieur **M.ZAOUIA**, examinateur, MCA à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Monsieur **H. DENOUN**, examinateur, MCA à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.*

*N'oublions pas familles et ami(e)s qui sont la source de toute détermination de notre travail.*

# ***SOMMAIRE***

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

### **Chapitre I : Production d'énergie électrique.**

I.1 Introduction .....	2
I.2 Les centrales électriques .....	3
I.2.1 Centrale thermique .....	4
I.2.2 Centrale hydroélectrique.....	5
I.2.3 Centrale nucléaire .....	7
I.2.4 Centrale éolienne .....	14
I.2.4 Centrale Photovoltaïque.....	18
I.3 Consommation d'énergie primaire dans le monde .....	23
I.3.1 Consommateurs d'électricité.....	25
I.4 Conclusion .....	25

### **Chapitre II : Généralités sur les machines synchrones.**

II.1 Introduction .....	26
II.2 Présentation de la machine synchrone .....	27
II.2.1 Constitution .....	27
II.2.2 Types de machines synchrones.....	28
II.2.2.1 Machines synchrones à aimants permanents .....	28
II.2.2.2 Machines synchrones à rotor bobiné .....	29
II.3 Excitation des machines synchrones .....	30
II.3.1 Excitatrices à courant continu.....	30

II.3.2 Excitatrice-alternateur (sur redresseur) .....	31
II.3.3 Auto-excitation .....	32
II.4 Présentation d'un l'alternateur.....	33
II.4.1 Les composantes de l'alternateur .....	34
II.4.1.1 Le stator .....	35
II.4.1.2 Le rotor .....	36
II.4.2 Principe de fonctionnement.....	39
II.4.3 Refroidissement de l'alternateur .....	40
II.4.4 Alternateur sur le réseau.....	40
II.5 Groupe d'excitation.....	41
II.5.1 Description du groupe d'excitation.....	41
II.5.2 Refroidissement du groupe d'excitation .....	43
II.6 Conclusion.....	44

**Chapitre III : Modélisation de la machine synchrone et de l'ensemble turbine-alternateur.**

III.1 Introduction .....	45
III.2 Modélisation de la machine synchrone.....	45
III.2.1 Hypothèses simplificatrices .....	45
III.2.2 Définition des axes .....	46
III.3 Équations électriques.....	47
III.3.2 Équations magnétiques .....	48
III.3.3 Transformation de Park.....	51
III.3.4 Choix des différents repères.....	52

III.4	Modèle de la machine synchrone dans le plan d <sub>qo</sub> .....	52
III.4.1	L'équation des flux statorique dans le plan d <sub>qo</sub> .....	54
III.4.2	Établissement des équations électriques .....	55
III.4.3	Etablissement de l'équation du couple électromagnétique.....	57
III.4.4	Equation mécanique .....	58
III.5	Modèle de simulation de la machine synchrone .....	59
III.6	Modélisation de la turbine à vapeur.....	61
III.6.1	Description du Modèle.....	62
III.6.2	Caractéristique du modèle.....	63
III.6.3	Puissance de la turbine à double extraction.....	64
III.6.4	Identification de la chute de pression dans une canalisation .....	65
III.7	Conclusion .....	67
 <b>Chapitre IV : Simulation d'un ensemble Turbin-alternateur.</b>		
IV.1	Introduction.....	68
IV.2	Schéma fonctionnel de la turbine et du système de commande.....	69
IV.3	Contrôleurs PID .....	71
IV.4	Model de simulation Turbine-Alternateur sous Matlab-Simulink.....	72
IV.5	Résultats de la simulation.....	73
IV.6	Conclusion.....	77
	<b>Conclusion générale</b> .....	<b>78</b>

***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références bibliographiques

- [1] Bensalem Ahmed, « Analyse Et Gestion De La Production Des Centrales Electriques Liées Aux Réseaux Electrique De Grande Taille ». Thèse de doctorat d'état, Université de El-Hadj Lakhdar, Batna, 28 juin 2007
- [2] Hiber fateh et Abbabsa Rabeah, « Optimisation De Transfert De Puissance Sur Un Réseau Electrique », Thèse D'ingénieur D'état En Electrotechnique, Université de El-HadjLakhdar, Batna, 2007
- [3] Guillaume ALIX, L'ECOLE CENTRALE DE LYON, Spécialité : Thermique et Energétique ; N° d'ordre : 2008-03
- [4] Electrotechnique, Théodor Wildi, 3me édition, 2000.
- [5] TH. Margoulova, « Les Centrales Nucléaires », Edition Mir. Moscou, 1983
- [6] Bendali Salhi « identification du désaccordage et des couplages aéroélastiques dans les roues de turbines » thèse de doctorat, université de Franche-Comté, 28 mars 2008
- [7] CEA, « le fonctionnement d'un réacteur nucléaire » Imprimerie de Montligeon -09/2002, [www.cea.fr](http://www.cea.fr).
- [8] B. Robyns (responsable) et S. Labrique (réalisation), site: [www.e-lee.net](http://www.e-lee.net) – « Composants classiques d'une éolienne », consulté juin 2009
- [9] H. Camblong – « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003
- [10] L. Leclercq – « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [11] F. Poitiers – « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [12] M. Angel Cid Pastor « Conception et Réalisation de Module Photovoltaïques Electroniques » Thèse de doctorat en Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 29 septembre 2006.
- [13] Nichiporuk Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités » Thèse de doctorat en génie électrique, L'institut national des sciences appliquées, Lyon, 03 mai 2005

## Références bibliographiques

---

- [14] ADEME (16/05/2013), Avis de l'ADEME sur le solaire photovoltaïque
- [15] Ministère de l'Énergie et des Mines, "Guide des Énergies Renouvelables", Édition 2007
- [16] Brahim (MEM), "Situation des énergies renouvelables en Algérie". Conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marché, 2001, Hôtel Sheraton, Alger, Algérie.
- [17] « BP Statistical Review of World Energy 2014 » [archive], BP (consulté le 19 juin 2014)
- [18] CIA World Factbook - Version du Janvier 1, 2014
- [19] Source: Key World Energy Statistics, IEA - 2013, AFHYPAC – Th.A. Révision : septembre 2014
- [20] Michel LAJOIE-MAZENC et Philippe VIAROUGEN Technique de l'ingénieur, alimentation des machines synchrones. **Juin 1991**
- [21] Mouad Oubidar Thèse de doctorat (Modélisation de la machine synchrone et asynchrone), université de Québec, 2010.
- [22] J. Chatelain chapitre 9, Terminale Génie Electrotechnique. collection TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ. année 1989
- [22.1] F. Runcos, R. Carlson, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, H. Voltolini "performance and Vibration Analysis of a 75 kW Brushless Double Fed Induction Generator Prototype" IAS, Vol. 5, 2006, P 2395-2402
- [23] Pierre WETZER Techniques de l'Ingénieur, D3 545 excitation des machines synchrones. Date de publication : 10 févr. 1997
- [24] V.I. IZVEKOV, N.A. SIRIKHIN, A.I. ABRAOV, (La conception des turbo-alternateurs), Moscow maison d'édition, 2005.
- [25] M. GUILBERT RUELLE, (Turbo-alternateur), Technique de l'ingénieur, 1990.
- [26] ANSALDO, (Alternateur Volume de HAMMA II), Manuel de formation de la centrale HAMMA, Initiation à l'exploitation.
- [27] Manuel de formation de la centrale CAP-DJINET. Siemens 1985.
- [28] BARRET Philippe, (Régime transitoire des machines tournantes électriques). Eyrolles, 1982
- [29] GUY STURTZER, SMIGIEL Eddie, (Modélisation et commande des moteurs triphasés). Paris Ellipse, 2000.

## *Références bibliographiques*

---

- [29.1] Pawel olszewski, optimization of steam multi-turbines system, university of Michigan, 2350 hayward street, ann arbor, mi 48109-2125, usa applied thermal engineering 71 (2014) 230e238
- [30] Ali Chaibakhsh, Ali Ghaffari, Steam turbine model, Simulation Modeling Practice and Theory 16 (2008) 1145–1162.
- [31] José Martin Medina-Flores, Martin Picon-Nunez, Modelling the power production of single and multiple extraction steam turbines, chemical engineering science 65 (2010) 2811–2820.
- [32] Dragan Uro\_sevic A, Du\_san Gvozdenac B, Vojin Grkovic B, Calculation of the power loss coefficient of steam turbine as a part of the cogeneration plant Energy 59 (2013) 642e 651.
- [33] Philip kiameh, power generation Handbook 2/E, steam turbines and auxiliaries, from power generation handbook: selection, applications, operation, and maintenance, copyright 2012.
- [34] A. Ray, Dynamique modelling of power plant turbines for controller designe, the C.S.Draper Laboratory, Inc., Combridje, ma 02139, USA October 1979.
- [35] Rabindra Kumar Sahu, Sidhartha Panda, Saroj Padhan, A hybrid firefly algorithm and pattern search technique for automatic generation control of multi area power systems Electrical Power and Energy Systems 64 (2015) 9–23.
- [36] S.BEDWANI (Introduction à MATLAB) The Math Works.05/05/2011
- [37] Wei Li, Luigi Vanfretti , Yuwa, Chompoobutrgool development and implementation of hydro turbine and governor models in a free and open source software package kth royal institute of technology, school of electrical engineering, electric power systems, teknikringen 33, se-100 44 stockholm, Sweden
- [38] S. C. tripathy, Digital governor for use in computer control of a generating unit, PII: S0196-8904(97)10033-4, Energy Convers. Mgmt Vol. 39, No. 10, pp. 973-983, 1998 CC 1998 Elsevier Science.

***INTRODUCTION  
GENERALE***

## *Introduction générale*

L'accroissement rapide de la production mondiale de l'énergie électrique repose sur l'hypothèse d'un taux de croissance économique mondiale de 3,1%. Ce taux de croissance est suscité par une progression de l'activité économique humaine, par l'accroissement de la population et par l'exigence d'une grande qualité de l'énergie électrique, [1].

Donc une nécessité de production de cette dernière se pose. Pour cela on fait appel à des unités de production qui sont les centrales électriques. En Algérie, les deux principaux modes de production d'électricité sont les centrales à gaz et les centrales thermiques à vapeur. La consommation d'énergie augmente à un rythme de 10% par an, cela s'explique par l'accroissement de la population, et la demande sans cesse croissante de la consommation dans l'industrie.

Avec les énormes investissements que requièrent la mise en service et l'opération de ces centrales, qui fonctionnent avec des machines tournantes, de plus en plus performantes et complexes par exemple le groupe turbine-alternateur. Il est impératif d'étudier ce groupe pour pouvoir comprendre comment cette énergie électrique est produite.

La difficulté d'effectuer des essais en plein charge pour une centrale de production d'où la nécessité à recourir à la modélisation et à la simulation.

Notre objectif dans ce présent travail se résume à la modélisation et simulation d'un ensemble turbine-alternateur, en identifiant leurs fonctionnements et leurs comportements vis-à-vis des différents types de fonctionnement.

Notre travail est réalisé en quatre chapitres et une conclusion générale :

- Le premier chapitre présente les différentes centrales électriques les plus utilisées.
- Nous consacrons le deuxième chapitre à l'étude de la machine synchrone en mode générateur.
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation d'un système constitué d'une turbine, d'un alternateur, disjoncteurs, charges et l'ensemble des dispositifs de contrôle et de commande.
- Le quatrième chapitre est le dernier, on a fait appel au logiciel de simulation (MATLAB-simulink) dans le but d'étudier et de mettre en évidence les différents phénomènes régissant la variation de la charge.
- Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# ***CHAPITRE I***

## **I.1 Introduction**

Aujourd'hui l'énergie électrique représente environ un tiers de l'énergie consommée dans le monde. Parmi les différents moyens et systèmes de production, la différence se situe dans l'énergie primaire d'utilisation pour l'entraînement des machines tournantes, comme le gaz naturel, l'hydrogène, le diesel ainsi que les énergies dites renouvelables comme le soleil et le vent.

Les machines synchrones et asynchrones sont très utilisées dans les systèmes de production d'énergie électrique. Elles se différencient par rapport aux types de raccordement au réseau électrique. Généralement, les générateurs synchrones sont directement connectés au réseau, et d'autre comme les générateurs asynchrones (MADA) celles-ci par fois nécessite un interfaçage d'électronique de puissance (Redresseur et onduleur) comme dans le cas des piles à combustibles ou des panneaux solaires.

A l'heure actuelle et précisément en Algérie, le moyen prépondérant de production, reste toujours les centrales électriques à part entière telles, les centrales thermiques à vapeur et les turbines à gaz. D'autres moyens existent comme, les groupes diesel ainsi que la cogénération dans certaines usines de raffinage et la pétrochimie dont le moyen de production est interne propre à l'entreprise.

Pour satisfaire la demande d'électricité il existe une grande variété de moyens de production, depuis les équipements hydrauliques, pour lesquelles les investissements sont élevés et les coûts proportionnels pratiquement nuls, jusqu'aux turbines à gaz, où le combustible est un poste important du prix de revient, [2].

Pour fournir à tous, une énergie propre, sûre et compétitive tout en tenant compte de l'environnement, les compagnies d'électricité se sont orientées vers le développement des parcs de production qui utilisent et combinent toutes les énergies concevables et disponibles. Présentement les principaux types de centrales en service, on trouve, [1] :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermique classiques.
- Les centrale thermiques nucléaires.
- Les centrales hydroélectriques.
- Les centrales solaires ou photovoltaïques.
- Les centrales éoliennes.

## I.2 Les centrales électriques

### I.2.1 Centrale thermique

L'énergie thermique peut être convertie en énergie électrique ou en énergie mécanique pour être exploitée. La conversion en énergie électrique passe dans un premier temps par la conversion de la chaleur en énergie mécanique (moteur, turbine) pour faire tourner des générateurs électriques produisant de l'électricité.

Les centrales de production électriques utilisent ce principe avec du charbon, du pétrole (centrales thermiques classiques) ou de l'uranium enrichi (centrales nucléaires) pour produire la chaleur initiale, [3]. La plupart ont une capacité comprise entre 200 MW et 2000 MW afin de réaliser les économies d'une grosse installation, [4]. Figure I.1.a



**Figure I.1.a** Centrale thermique de Cordemais, la plus importante centrale thermique Française[1]

**a- Centrales thermiques classiques**

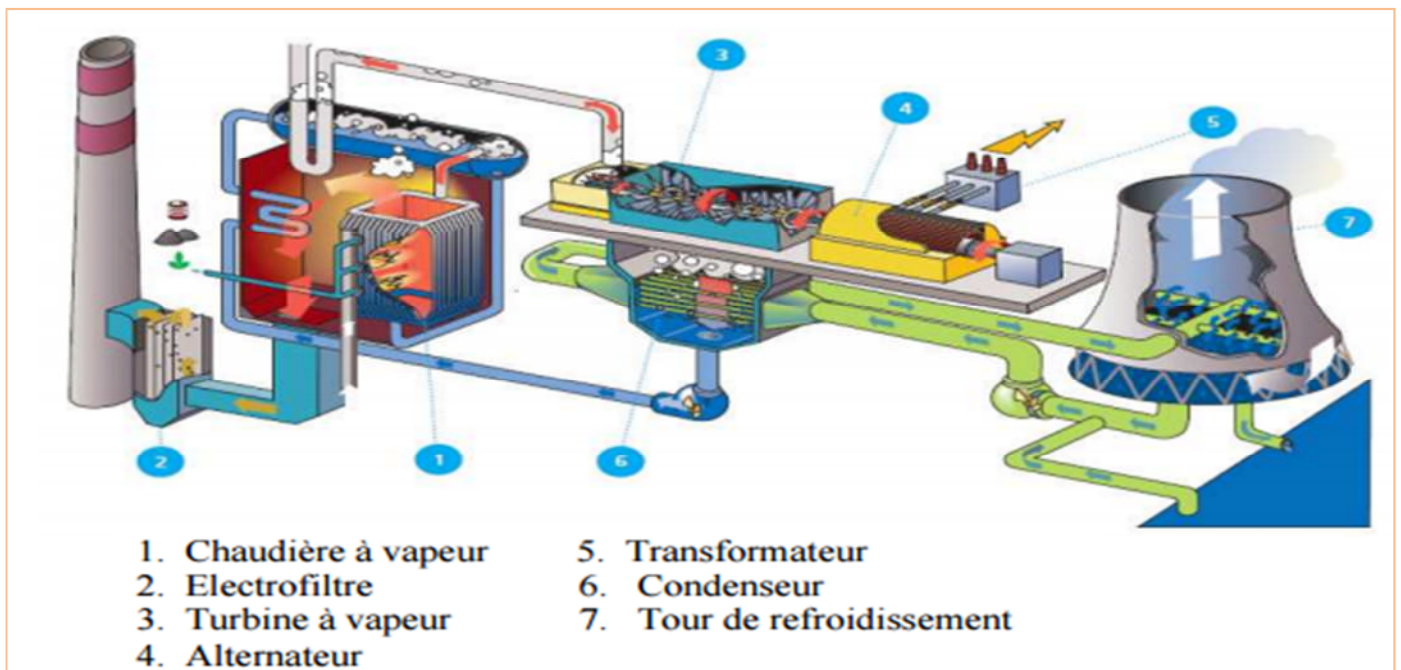
Dans une centrale thermique classique, appelée aussi centrale à flamme, l'énergie électrique est produite, à partir de l'énergie thermique de combustion d'un fossile (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.), préalablement convertie en énergie mécanique par une turbine, [1].

**• Centrale à vapeur**

Une centrale thermique comprend une ou plusieurs unités thermiques. Chaque unité se compose principalement d'une chaudière ou d'un générateur de vapeur, d'une turbine et d'un turboalternateur comme il est montré à la figure I.1.b. Le principe de fonctionnement d'une unité thermique se résume comme suit :

Le combustible, charbon, fioul ou gaz, est brûlé dans une chaudière. La chaleur dégagée transforme l'eau en vapeur. La turbine est alors alimentée de la chaudière par la vapeur et la pression. La turbine à vapeur transforme l'énergie cinétique d'un flux de vapeur d'eau en énergie mécanique, entraînant le turboalternateur couplé à cette turbine qui génère ainsi l'électricité. La vapeur redevient ensuite eau en traversant le condenseur, puis repart pour un nouveau cycle vers la chaudière, [1].

La figure I.1.b décrit l'ensemble des constituants d'une centrale thermique à vapeur avec ;



**Figure I.1.b :** Principe d'une centrale thermique à vapeur

Quel que soit le combustible utilisé, les bruleurs sont tapissés d'un système de tubage logés à l'intérieur d'une chaudière. Sous l'effet de la chaleur, l'eau se transforme en vapeur, à laquelle est envoyée sous pression vers les turbines. Ces dernières tournent en entraînant avec elles l'alternateur et avec l'excitation du rotor, on obtiendra de l'électricité.

Une fois l'électricité est produite, et à l'aide des équipements statiques comme les transformateurs elle sera transportée vers les consommateurs via les réseaux électriques. Après la détente, la vapeur est récupérée dans des condenseurs puis renvoyée à nouveau dans la chaudière.

### I.2.2 Centrale hydroélectrique

L'énergie hydraulique qui provient de la captation de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux, est une énergie renouvelable. C'est une source d'énergie propre et non polluante de l'environnement, économique et fiable. La mise en service est simple et très rapide, en effet lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir les vannes pour commencer le cycle de production d'électricité. Ces caractéristiques lui permettent d'être très flexible pour la régulation de la charge électrique, elle est avantageusement utilisée lors des pics de consommation, ce qui permet d'éviter la mise en route coûteuse des autres types de centrales électrique reliées au même système.

L'hydroélectricité met en valeur une richesse naturelle importante et produit une énergie propre et entièrement renouvelable, sans aucune émission de gaz à effet de serre. Leur principal désavantage est qu'elles ne sont pas des énergies qui peuvent répondre à des besoins certains, à des moments sûrs, c'est-à-dire que la production d'énergie électrique est dépendante des conditions météorologiques, [1].



**Figure I.2.a :** Centrale hydraulique d'Iffezheim sur le Rhin (Alsace)[2]

L'ensemble des constituants d'une centrale hydroélectrique sont représentés par la figure I.2.b.

1. Lac de retenue (réservoir)
2. Conduite forcée
3. Turbine
4. Alternateur
5. transformateur

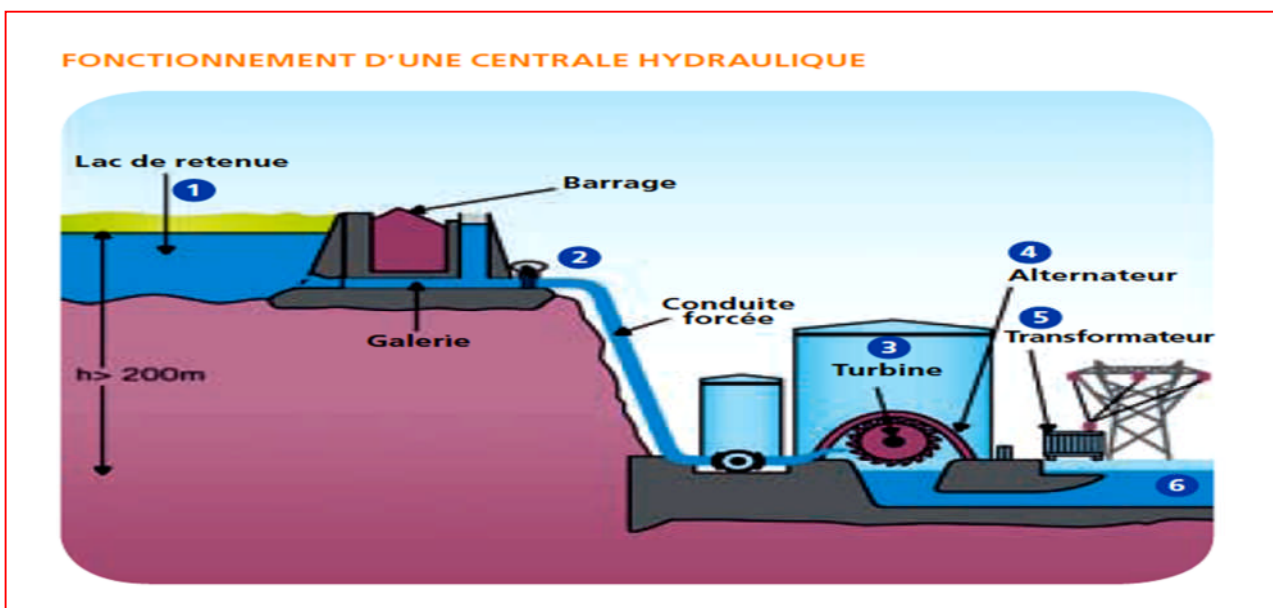


Figure I.2.b : Principe d'une centrale hydroélectrique [3]

L'énergie hydroélectrique utilise la force de l'eau, c'est-à-dire, la combinaison d'un débit et d'une chute afin de produire de l'énergie électrique. Autrement dit, l'énergie potentielle de l'eau retenue dans le réservoir se transforme en énergie cinétique, ce qui entraîne la rotation de la turbine hydraulique. La turbine est couplée à un alternateur qui va produire à son tour de l'électricité, [1].

Les centrales hydroélectriques sont classées en trois grandes catégories selon la hauteur de chute d'eau et par voie de conséquence, selon le débit ; on trouve, [1] :

- Les centrales électriques de haute chute  
Sites de montagne avec un dénivelé important comme la centrale du Portillon dans les Pyrénées (1420 m de chute dans une conduite forcée) mais dont les débits sont faibles
- Les centrales électrique de moyenne chute (débit plus fort)
- Les centrales électriques de basse chute.

Selon la nature du barrage (barrage-voûte, poids, contrefort, en enrochement ou en terre, mobile...) : haute, moyenne ou basse chute, on utilise respectivement trois types principaux de turbines telles :

1. Pelton : Cette turbine est du type « à action »
2. Francis : Une turbine Francis est une turbine hydraulique de type « à réaction »
3. Kaplan : Une turbine Kaplan est une turbine hydraulique à hélices de type propulsion.

#### **a- Principe de fonctionnement**

Pour produire de l'électricité, il faut la combinaison d'un débit d'eau  $u$  [ $m^3/s$ ] et d'une chute  $h$ [m] qui est la différence entre un point haut et un point bas de niveau d'eau. Pour réaliser cette combinaison, le complexe hydroélectrique comprend un barrage construit en travers du lit d'un cours d'eau pour en retenir les eaux et pour créer ou aménager une chute en vue d'actionner les turbines de la centrale électrique. La turbine est un élément rotatif qui convertit l'énergie d'un courant d'eau. Il permet de transformer l'énergie potentielle en énergie mécanique puis électrique par l'intermédiaire d'un alternateur, [1]

### **I.2.3 Centrale nucléaire**

Le caractère limité des réserves de combustibles fossiles et la nécessité d'utiliser ces combustibles comme matières premières pour l'industrie chimique entrent en contradiction avec la nécessité d'assurer le développement de production d'énergie électrique, cette contradiction ne peut être résolue que par le développement de l'énergie nucléaire.

De nos jours, la technique nucléaire a son actif des succès certains. A l'époque de la première conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques (Genève 1955) il n'y avait en exploitation qu'une seule centrale nucléaire d'une puissance de 5MW. C'était la première centrale nucléaire au monde, mise en service en U.R.S.S. au mois

de juin 1954, l'expérience acquise au cours de la mise en service et du fonctionnement de cette centrale a démontré qu'il était réellement possible de produire de l'énergie électrique utilisable à une échelle industrielle à partir de l'énergie nucléaire.

Il faut noter que les centrales nucléaires sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques, [1]. Figure I.3.a



**Figure I.3.a** : Centrale nucléaire de Cattenom (France) [4].

### a- Structuration

L'unité de production comprend trois circuits principaux indépendants liés uns par rapport aux autres. Un circuit primaire, un circuit secondaire et un circuit tertiaire de refroidissement, figure I.3.b.

- **Le circuit primaire** : L'eau est sous pression (volume compris entre 270 m<sup>3</sup> et 460 m<sup>3</sup> selon le palier de puissance et une forte pression (155 bars), il est composé d'un réacteur relié par l'ensemble de la tuyauterie aux générateurs de vapeur (3 à 4 générateurs suivant la puissance). L'eau du circuit primaire circule en boucle grâce à de puissantes pompes, puis chauffée en traversant le cœur du réacteur. En fonctionnement normale, sa température varie entre (286 à 323 °C) selon la puissance. Ce matériel est implanté dans un bâtiment confiné, dénommé Bâtiment du Réacteur (BR). Du fait des rayonnements émis par le réacteur, l'eau du circuit primaire est radioactive. [5].

- **Le circuit secondaire** : Il est composé d'eau et de la vapeur (volume compris entre 2 000 m<sup>3</sup> et 2 500 m<sup>3</sup> selon le palier de puissance).

Dans ce circuit, l'eau suit un cycle thermodynamiquement fermé, en passant alternativement par la phase liquide à la phase vapeur. La vapeur issue des générateurs de vapeur sous pression (58 bars – 77 bars) alimente la turbine en entraînant l'alternateur, ce qui explique l'étape de production d'électricité.

La vapeur humide s'échappe par la suite vers le condenseur, composé d'un ensemble de tubes parcourus par de l'eau froide prélevée au milieu aquatique (fleuve, rivière, mer), cette vapeur cède le reste de sa chaleur en échange avec l'eau prélevée. [5].

L'eau parcourt le poste d'eau, puis le circuit d'alimentation des générateurs de vapeur pour recommencer son cycle. N'étant pas en contact direct avec l'eau du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire n'est pas radioactive.

- **Le circuit tertiaire** : L'eau de refroidissement (volume compris entre 25 000 m<sup>3</sup> et 50 000 m<sup>3</sup> selon le palier de puissance). Le refroidissement du condenseur peut être assuré par deux types de circuit (ouvert ou fermé). En circuit ouvert, l'eau prélevée au milieu des tubes du condenseur après détente, il retourne directement au milieu aquatique. Dans ce cas, l'énergie thermique extraite du condenseur est intégralement transférée au milieu aquatique. En circuit fermé, l'énergie thermique extraite est cédée en quasi-totalité à l'atmosphère au moyen d'un Aéro-réfrigérant. Ce circuit fait l'objet d'un appoint d'eau prélevée en rivière et d'une purge continue par laquelle une faible partie de l'énergie thermique est transférée au cours d'eau. [5].

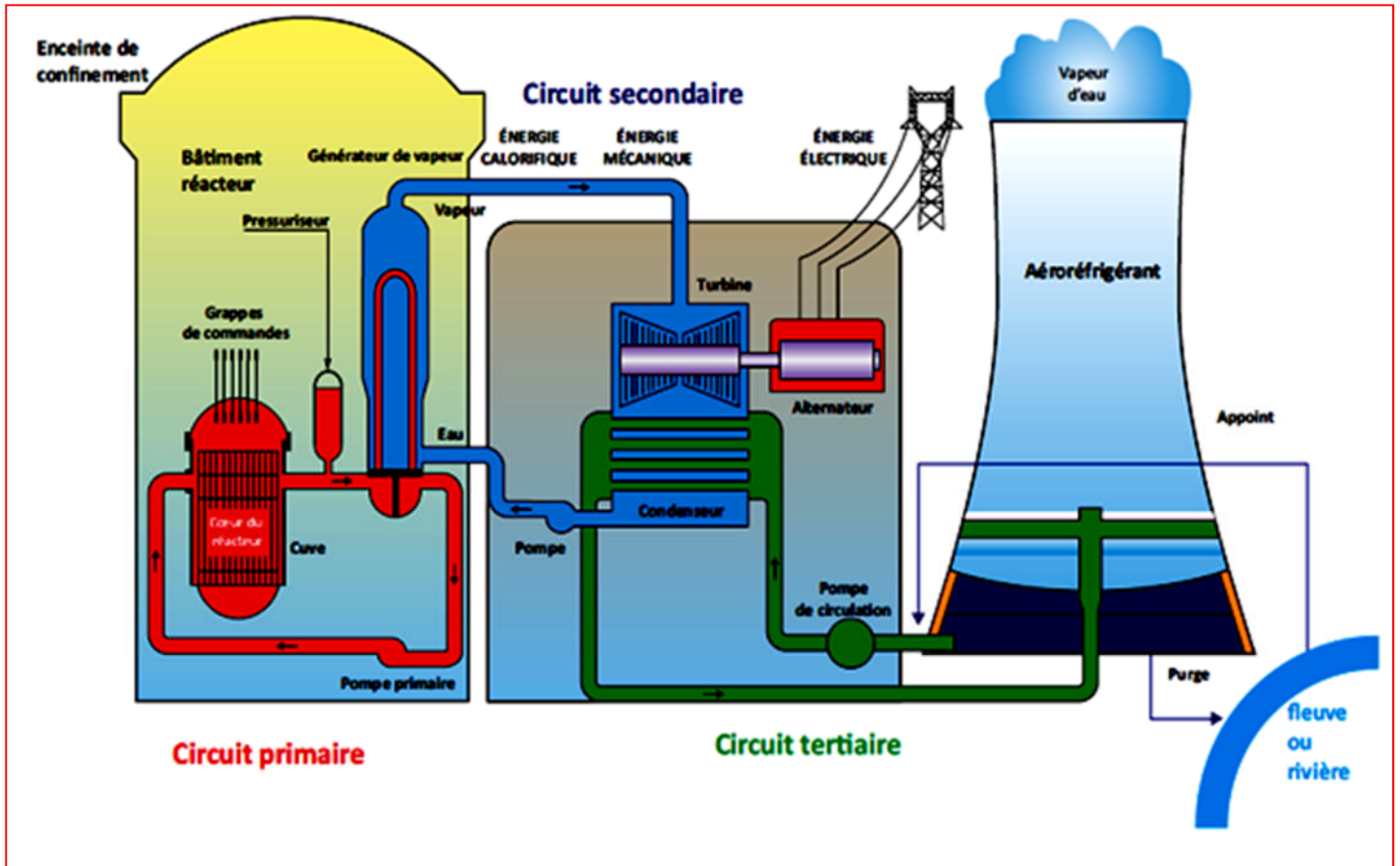


Figure I.3.b. Principe d'une centrale nucléaire [5].

### b- Fonctionnement

D'après la figure I.4, pour produire de l'électricité, une centrale nucléaire a notamment besoin de :

- **Le combustible nucléaire**

Le combustible d'une centrale nucléaire contient des atomes fissiles dont on va extraire de l'énergie par fission. Les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Seul l'uranium 235 se trouve à l'état naturel. C'est donc le plus souvent lui qui est utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires. Le combustible nucléaire est placé dans le cœur du réacteur, [6].



**Figure I.4 :** Les crayons de combustible renferment de l'oxyde d'uranium, [6].

- **L'eau** : prélevé des rivières ou en mer pour assurer le refroidissement des installations, principalement les condenseurs des groupes turbo-alternateurs produisant l'électricité, et alimenter les différents circuits. [6].
- **Substances chimiques** : Pour la protection et le traitement de certains circuits en fonctionnement. Des influents liquides et gazeux, radioactifs et chimiques dont les rejets dans l'environnement sont réglementés. L'eau prélevée en mer ou en rivière pour le refroidissement des installations conduit à des rejets thermiques faisant eux aussi l'objet de limites réglementaires [6].figure I.5.

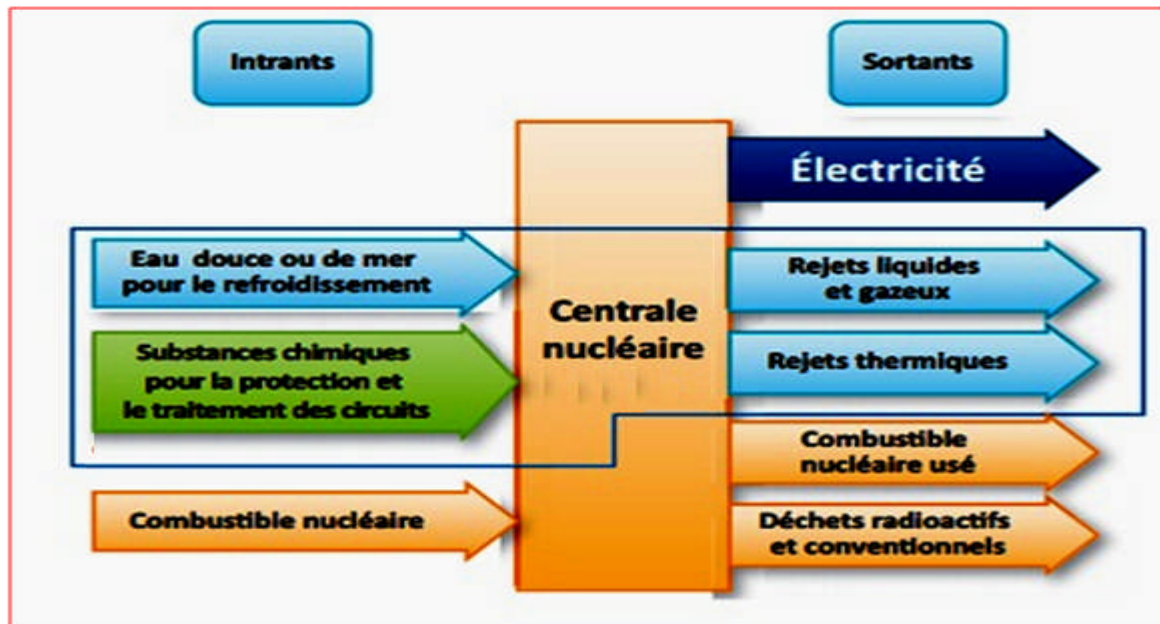


Figure I.5 : Les intrants et les sortants d'une centrale nucléaire [6].

### c- Refroidissement

Quel que soit le système de refroidissement, l'eau joue un rôle primordial dans le fonctionnement d'une centrale nucléaire. Il existe alors, deux types de refroidissements :

**Refroidissement ouvert** : Lorsque la centrale nucléaire est refroidie en circuit ouvert, le prélèvement est important (38 à 61 m<sup>3</sup>/s) rapporté à l'énergie électrique nette produite par la centrale, celui-ci varie de 150 à 230 L/kWh. Ce type de circuit ne peut être installé que sur des sites en bord de mer ou sur des grands fleuves. En circuit ouvert, l'eau prélevée est restituée en quasi-totalité (> 99 %) au milieu aquatique après s'être échauffée [6]. figure I.6

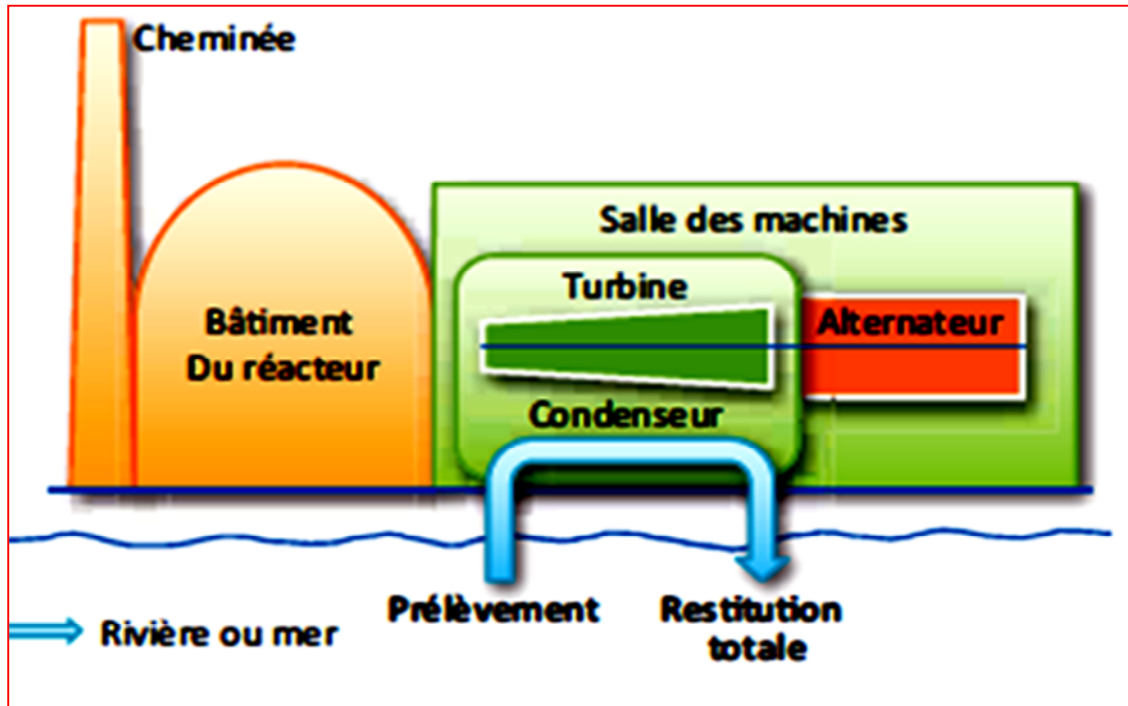
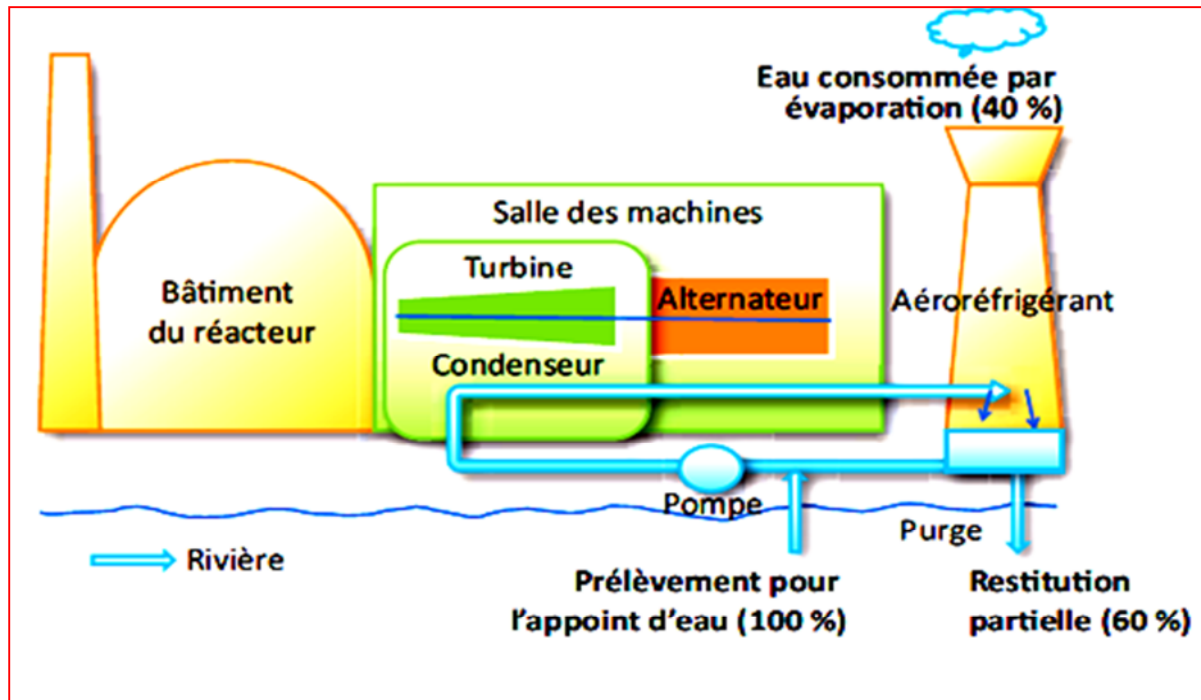


Figure I.6 : Circuit de refroidissement ouvert d'une centrale nucléaire

- **Refroidissement fermé** : Dans le cas des centrales équipées d'aéro-réfrigérants, le prélèvement d'eau est réduit à quelques  $\text{m}^3/\text{s}$ , il ne représente plus qu'entre 5 à 20 L/kWh rapporté à l'énergie électrique nette produite, mais une partie de l'eau prélevée (environ 40 % soit environ 2,5 L/kWh net) s'évapore dans la tour en émettant un panache de vapeur et ne regagne pas le cours d'eau [6], comme le montre la figure I.7.



**Figure I.7** Circuit de refroidissement fermé d'une centrale nucléaire

## I.2.4 Centrale éolienne

Pendant l'antiquité les moulins à vent transformaient l'énergie éolienne en énergie mécanique. Mais aussi les moulins à eau se chargeaient de cette tâche. La première éolienne dite « industrielle » (qui pouvait produire de l'électricité) fût créée en 1890 par Charles BUSH. Cette technologie ne rencontrera pas un franc succès, sûrement que grâce du choc pétrolier des années 1970.

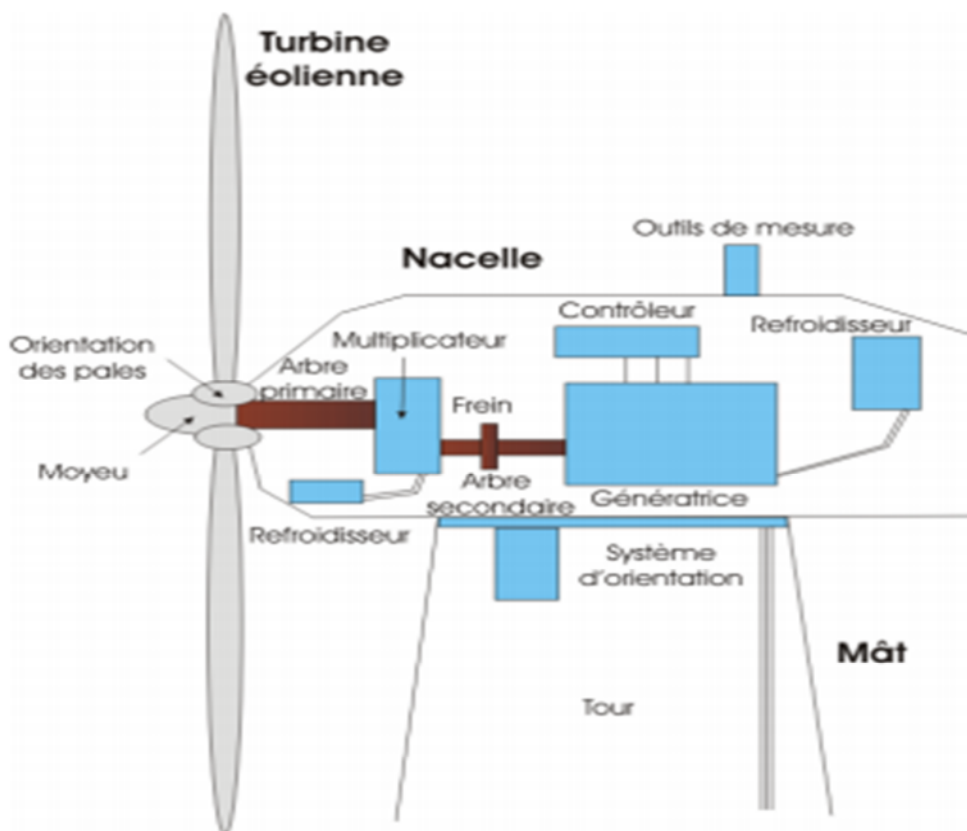
Une éolienne a un fonctionnement plutôt basique. C'est une grande structure composée d'un mat, d'une nacelle, de fondation et en général de 3 pales montées sur un rotor et bien sûr d'un générateur électrique. Figure I.8.



**Figure I.8 :** Centrale éolienne offshore de Middelgrunden chez Copenhague ,Danemark[6]

### a- Constitution d'une éolienne à axe horizontal

Une centrale éolienne typique est composée de différents organes. La figure I.9 donne un aperçu des principales parties dans le cas d'une éolienne à axe horizontal pour la production de masse [7]. Dans ce qui suit, nous allons décrire brièvement chacune des diverses parties ainsi que ses fonctions.



**Figure I.9 :** Principe d'une éolienne à axe horizontal [7]

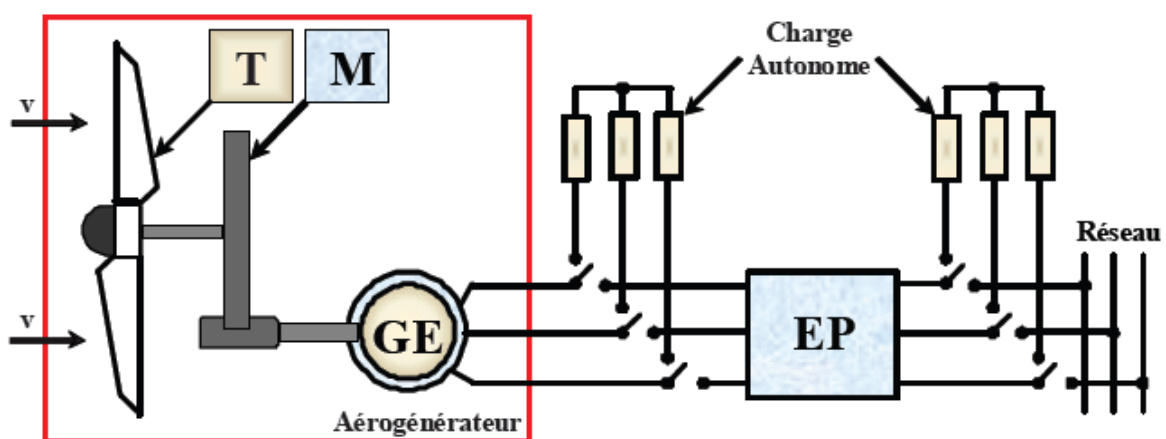
**b- Principe de fonctionnement**

Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est en fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales sont grandes, moins elles tourneront rapidement.

Les pales, le noyau et le rotor captent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en énergie mécanique de rotation. Le frein rend possible le fonctionnement de l'éolienne malgré des vents de plus de 90km/h qui pourraient l'abîmer ou réduire la vitesse de rotation du premier rotor. Le multiplicateur permet d'augmenter la vitesse de rotation d'un second rotor jusqu'à 30 tours/minute avec un système d'engrenages au-delà de 1000 tours/minute pour la génératrice électrique. La génératrice transforme l'énergie mécanique de rotation du second rotor en énergie électrique. Le système de régulation électrique ralentit le rotor du générateur en cas de surrégime. Le système d'orientation place la nacelle et donc les pales face au vent. [8].

D'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome.

Un schéma synoptique est présenté dans la figure I.10.



**Figure I.10** : Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

Le mât place l'éolienne à une certaine distance du sol, selon la configuration du terrain et les vents du lieu.

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est de 59 % ( puissance maximale démontrée par Albert Betz). Les machines actuelles ne peuvent pourtant qu'approcher les 50 %. Mais la technologie de l'éolienne se développe à grande vitesse et il sera bientôt possible de dépasser le fameux rendement de 59 %. [9].

Une des caractéristiques essentielles du vent est sa discontinuité. Il a fallu alors développer des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent pour pouvoir utiliser cette énergie aussi lors de périodes où le climat serait peu venteux.

Il existe aujourd'hui différentes possibilités de stockage si on ne peut pas injecter directement l'énergie dans les réseaux électriques tels:

- **Les batteries accumulateurs** : le moyen le plus utilisé pour la conservation de l'électricité. Ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW,
- **Le pompage à eau** : Pour les stockages importants, l'énergie éolienne peut être utilisée pour remplir un réservoir de stockage, l'eau sera ensuite turbinée pour restituer l'énergie. Comme un autre système de stockage se base sur le même principe de pompage de l'eau. L'énergie produite par le vent est utilisée pour chauffer le fluide d'un réservoir qui restituera pendant les périodes sans vent l'énergie stockée.

Le coût d'installation d'une éolienne varie de 15'000 \$ à 150'000 \$ en fonction de la puissance (entre 1 et 20 kW pour les plus petites), de la taille du mât et des travaux d'ancrage. [7].

Quelles soient à axe vertical ou horizontal, les éoliennes sont classifiées en trois catégories selon leur puissance nominale [10] :

- Les éoliennes de petite puissance : Moins de 40kW ;
- Les éoliennes de moyenne puissance : De 40kW à quelques centaines de kW ;
- Les éoliennes de grande puissance : 1MW et plus.

Dans le monde, l'utilisation de l'énergie éolienne reste encore un cas plutôt rare. Ceci est dû en particulier aux pollutions visuelles et sonores qui engendrent de nombreuses oppositions.

De plus, les lieux où l'exploitation à grande échelle de l'énergie éolienne pourrait être rentable sont rares. L'énergie éolienne est pourtant en forte progression dans le monde.

**Remarque :** Le Danemark est mondialement le pays qui possède le plus d'éoliennes. La production d'énergie électrique y est assurée à 20% par des parcs éoliens.

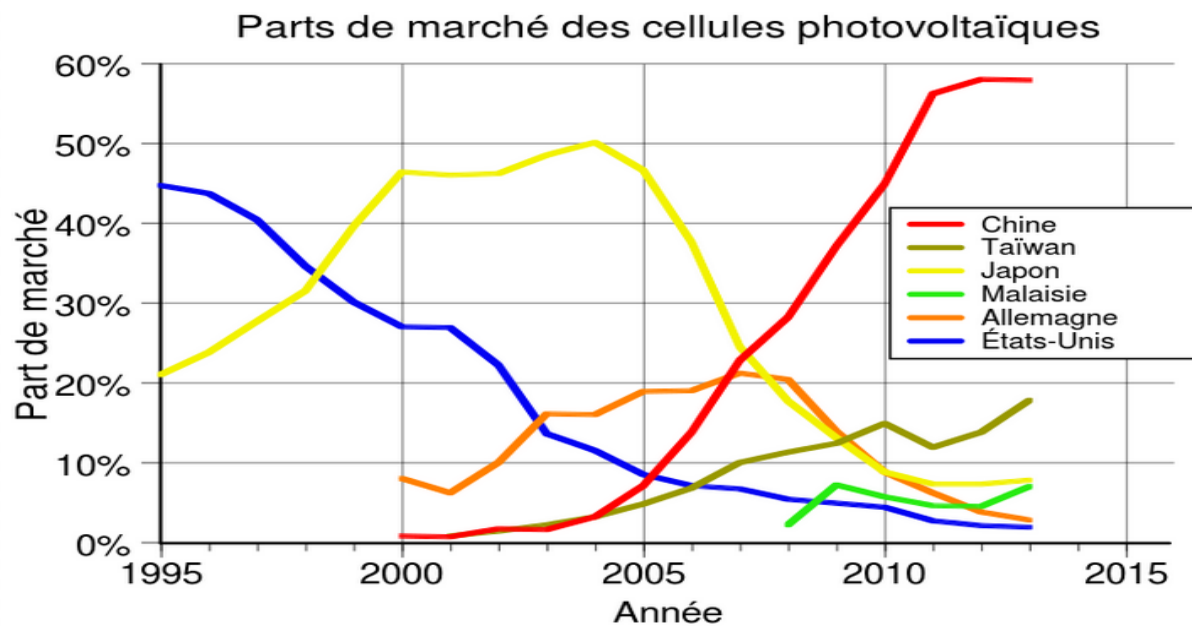
### I.2.5 Centrale Photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [12]. La production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante depuis les années 1990-95, pour dépasser les 700 MWc en 2003, [12].  
figure I.11.



**Figure I.11 :** Centrale photovoltaïque de Ghardaïa(Algérie).



**Figure I.12:** Part de marché des principaux pays producteurs de cellules photovoltaïques. [6]

L'Allemagne et l'Espagne ont diminué fortement les subventions de ce secteur. La production mondiale est depuis mi 2011 supérieure à la demande, et la chute des prix associée à la forte concurrence des producteurs chinois met bon nombre d'entreprises européennes et américaines en difficulté, les Chinois ont pris en 2012 80 % du marché, mettant en faillite une trentaine d'entreprise européennes.[13]

Pour faire face à cette croissance, la recherche dans le domaine s'oriente sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler opposés : augmenter le rendement des cellules, tout en diminuant les coûts de production. Le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque est le silicium cristallin (abondant, non toxique). Cependant, dans le coût du module, le prix du matériau intervient pour environ 50% et de nombreuses études visent donc à réduire les coûts relatifs à la préparation des substrats, [12].

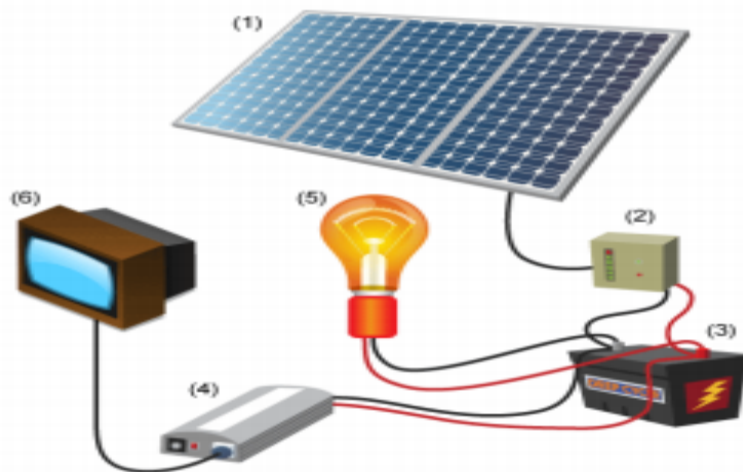
#### a- Schéma de l'installation

##### Installations électriques photovoltaïques autonomes

En site isolé, le champ photovoltaïque (1) (figure I.3) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique).

Un système de régulation (2) et une batterie (3) d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques. Le régulateur de charge (2) a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif (6). Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur (4).

On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés.

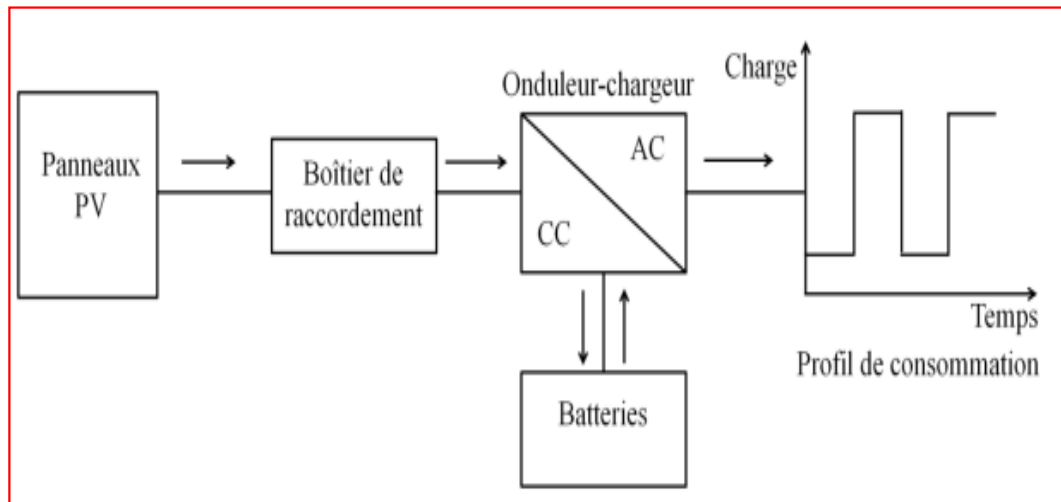


**Figure I.13 :** Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.

### **b- Schéma physique**

La chaîne de production du courant électrique en utilisant les systèmes photovoltaïque est généralement similaire au schéma représenté par figure I.14.



**Figure I.14 :** Schéma physique de la chaîne de conversion de d'énergie Photovoltaïque.

### c- Le Potentiel Solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de  $5\text{KWh}$  sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{KW h}=\text{m}^2=\text{an}$  au nord et  $2263\text{kwh}=\text{m}^2=\text{an}$  au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [14][15][16]

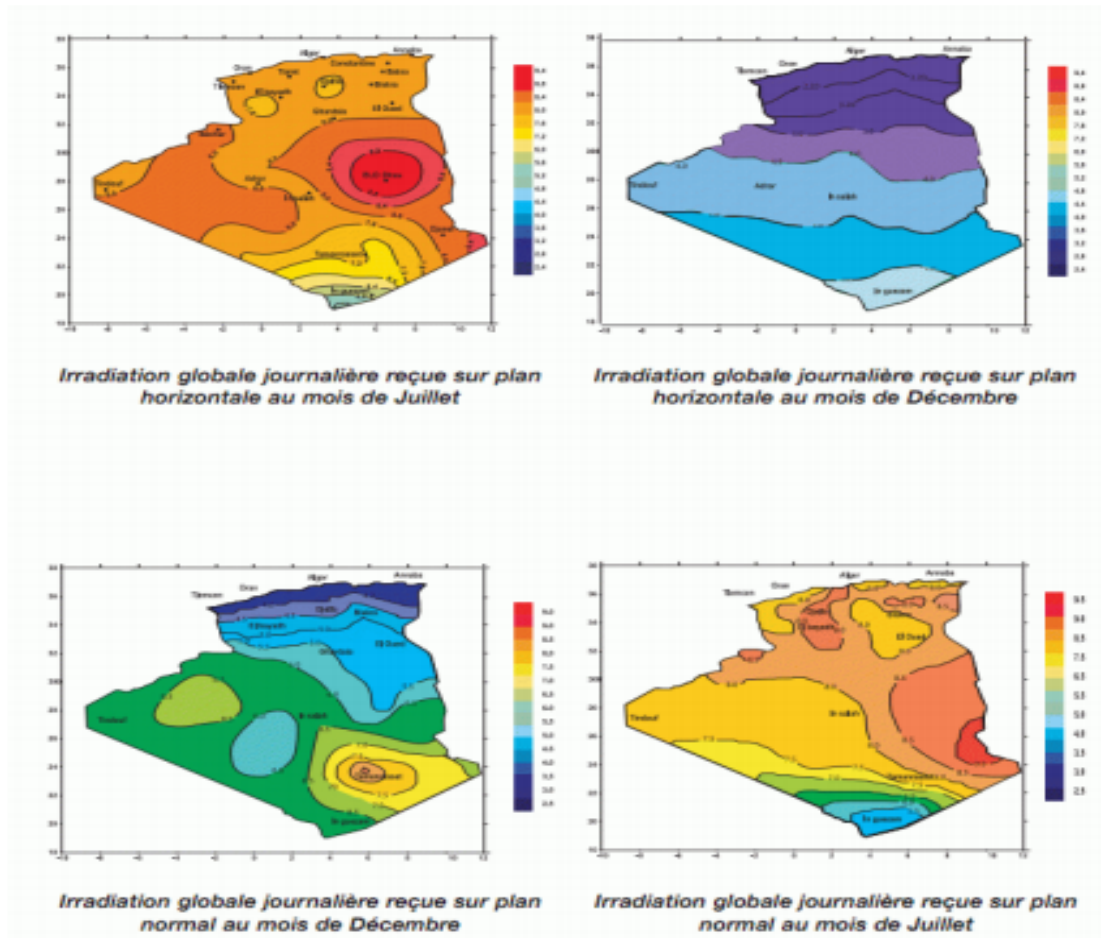


Figure I.15 : Potentiel solaire en Algérie.

Régions	Régions cotières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement ( <i>Heures/an</i> )	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ( <i>KWh/m<sup>2</sup>/an</i> )	1700	1900	2650

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh/an.

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement.

## d- Producteur d'électricité photovoltaïque dans le monde

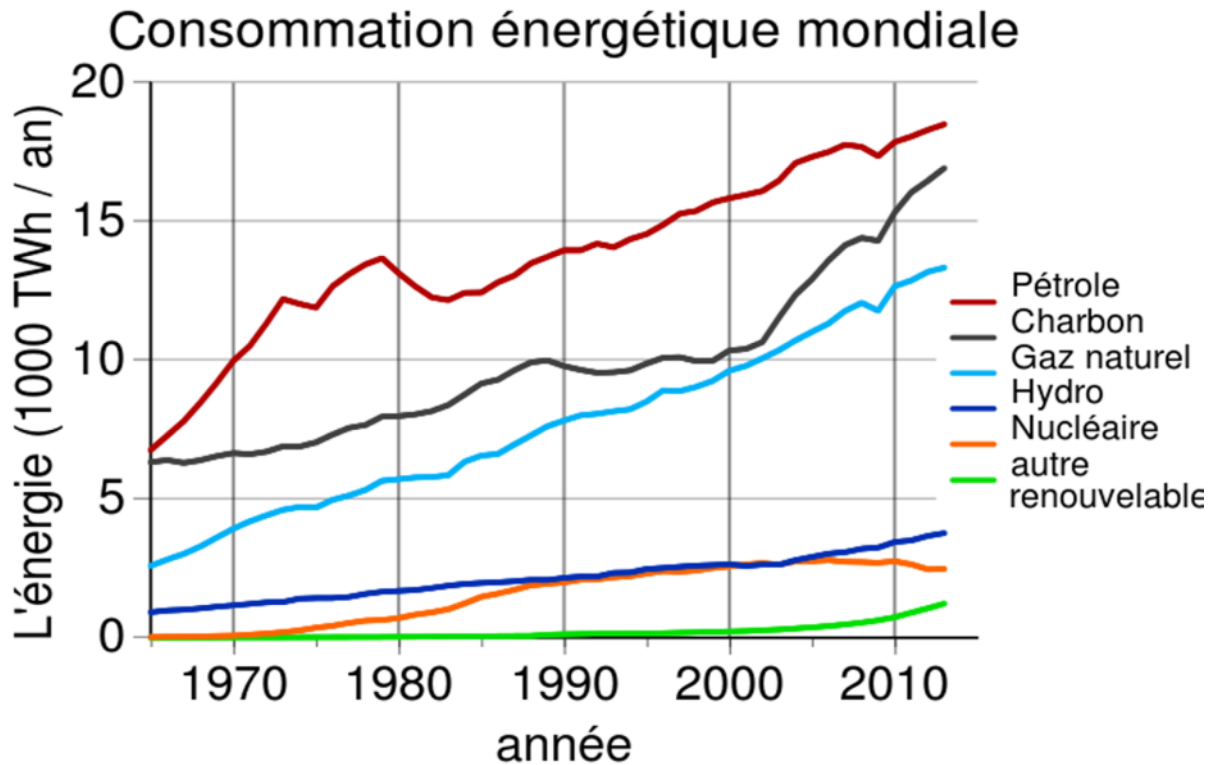
Pays	2011	2012	% 2012
 Allemagne	19,3	28,0	26,8
 Italie	10,8	18,9	18,0
 États-Unis*	5,8	15,0	14,3
 Espagne*	9,2	11,9	11,4
 Japon	3,8	7,2	6,9
 Chine	1,9	5,2	5,0
 France	2,0	4,1	3,9
 République tchèque	2,1	2,2	2,1
 Belgique	1,5	1,7	1,6
 Australie*	0,8	1,5	1,4
Reste du monde	4,3	9,0	8,6
<b>Monde</b>	<b>61,6</b>	<b>104,5</b>	<b>100,0</b>

Figure I.16 : Production d'électricité solaire en 2011 et 2012 (TWh) [7]

## I.3 Consommation d'énergie primaire dans le monde

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. Elle a plus que doublé en quarante ans (de 1973 à 2013). En 2009, à la suite de la crise de 2008, elle n'avait augmenté que de 1 %. La consommation énergétique mondiale (énergie primaire) était en 2012, selon l'Agence internationale de l'énergie de 13,37 milliards de tep (6,1 en 1973), pour une production énergétique mondiale de 13,5 milliards de tep (6,2 en 1973). 81,7 % de cette production provenait de la combustion d'énergies fossiles. Le reste de la production d'énergie provenait du nucléaire (4,8 %) et des énergies renouvelables (13,5 %) : bois énergie, énergie hydraulique, éolien, solaire, agro-carburants, .... Cette statistique sous-évalue la part des énergies renouvelables électriques (hydroélectricité, éolien, photovoltaïque) [17]

**Remarque :** On utilise le Joule ou la tonne d'équivalent pétrole (tep) pour comparer des formes d'énergie différentes.



**I.17 Consommation énergétique mondiale, en térawatts-heures (TWh), de 1965 à 2013 (Pétrole, charbon, gaz naturel, hydraulique, nucléaire, autre et renouvelable.)[17]**

**Remarque :** Pour produire 100KWh, il faut :

- 350 Kg de charbons
- 250 L de fuel
- 300 m<sup>3</sup> de gaz
- 4 g d'uranium enrichi

Chaque type d'énergie possède son unité privilégiée, et c'est pour les agréger ou les comparer que l'on utilise les **unités de base** que sont le Joule et le Mtep ou parfois le kWh, toute énergie primaire étant assez souvent convertie en électricité.

- Pétrole : tonne d'équivalent pétrole (tep)
- Gaz naturel : mètre cube, pied cube ou British thermal unit (btu)
- Charbon : tonne équivalent charbon (tec)

## I.4 Les pays consommateurs d'électricité

Nom de pays	Electricité - Consommation (milliards kWh)	Année
Chine	5,322	2014
États-Unis	3,886	2014
Russie	1,038	2014
Japon	860	2014
Inde	699	2014
Allemagne	583	2014
Canada	500	2014
France	463	2014
Brésil	456	2014
Corée du Sud	450	2014
Royaume-Uni	323	2014

**Figure I.18 : Les 11 pays les plus consommateur d'électricité en 2014 [18].**

La chine est le principale pays consommateur d'énergie électrique dans le monde 5.322 milliards KWh (chiffre de CIA World Factbook,2014), elle a été multipliée par 3,3 entre 2001et 2014, cela revient sans doute a sa croissance en flèche dans l'industrie, défiante tout géants de l'industries qui détient le marché mondial comme les USA et l'union européen .[18]

**Remarque :** L'Algérie est classée 58<sup>ème</sup> consommateur mondial avec 34 milliards KWh devant le Danemark , Irlande, le Maroc et le Qatar avec 21milliards KWh.

## I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une aperçue sur les différents modèles de production de l'énergie. Il s'avère qu'aujourd'hui et pour les cinquante années a venir, la gamme des sources d'énergie que nous pourrons utiliser restera conventionnelle. Actuellement, la consommation mondiale d'énergie requiert les combustibles fossiles (pétrole ,charbon, gaz) à hauteur de 81.7%, l'énergie hydraulique 2.3%, le nucléaire pour 5.3% et enfin les énergies renouvelable pour 10.9%. [19]

La production d'électricité s'appuie actuellement sur l'énergie thermique, cela revient à la maitrise de cette technologie par rapport aux autres types de centrale de production comme le nucléaire ou les énergies renouvelables.

## **II.1 Introduction**

La plupart des générateurs à courant alternatif sont des alternateurs, leurs puissances apparentes varient entre des centaines de [VA] et 1600 [MVA]. L'alternateur transforme en énergie électrique, l'énergie mécanique qui lui est fournie par la machine qui l'entraîne. Il est utilisé pour la production des tensions et des courants sinusoïdaux. Le rotor de l'alternateur est entraîné mécaniquement par un moyen quelconque (turbine, moteur diesel ... etc.). Le courant continu circulant dans l'enroulement de rotor engendre dans l'entrefer un champ magnétique.

Dans ce présent chapitre, d'une part nous présentons la Machine Synchrones à travers les définitions, la constitution et la citation des différents types des et des différents types d'excitation, et d'une autre part nous nous présentons les Turbo-alternateurs en donnant les définitions, la présentation de ses composantes et du groupe d'excitation et son principe de fonctionnement.

## II.2 Présentation de la machine synchrone

Les machines synchrones sont des machines réversibles, elles peuvent fonctionner comme moteurs et générateurs. Elles sont dites synchrones par rapport à l'égalité de la vitesse de rotation du champ tournant du rotor à la vitesse du synchronisme. Pour obtenir un tel fonctionnement, le rotor de la machine doit être excité ou bien conçu avec des aimants permanents. De telles machines sont généralement combinées avec des turbines pour concevoir des turbo-alternateurs à la production d'énergie électrique, Figure II.1.

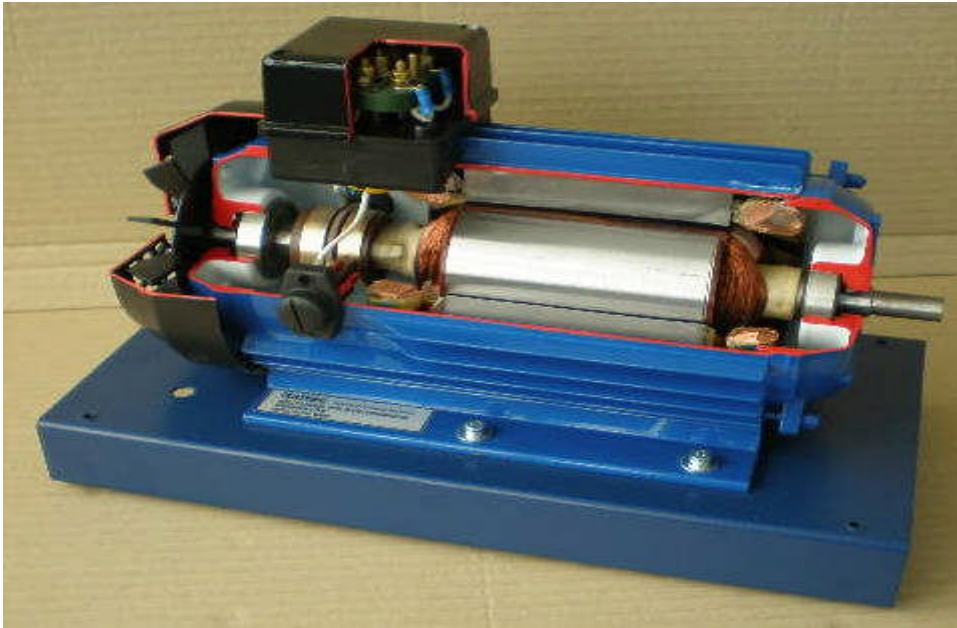


Figure II.1 : Machine synchrone

### II.2.1 Constitution

Les grandeurs des machines varient de quelques Watts pour les petits moteurs à plusieurs centaines de mégawatts pour les alternateurs de grande puissance.

Elles sont constituées de deux parties principales, l'induit et l'inducteur qui sont séparés par un entrefer cylindrique. L'induit (rotor) est constitué d'électro-aimant alimenté en courant continu ou d'un aimant permanent. Ces rotors sont de type à pôles lisses ou à pôles saillants, qui sont généralement unipolaire ou bipolaire, tournant à des grandes vitesses pour les générateurs à pôles lisses, et pour ceux à plusieurs pôles elles tournent plus lentement comme dans les centrales hydrauliques [20].

L'inducteur (stator) porte trois enroulements identiques décalés de  $2\pi/3$  radians les uns par rapport aux autres. Les conducteurs de ces enroulements sont logés dans des encoches à la périphérie du stator, pour les petites machines et des barres en cuivre pour les grosses machines. Elles ont aussi deux enroulements amortisseurs de chaque côté, reliés par des conducteurs de faible résistance [20].

## II.2.2 Types de machines synchrones

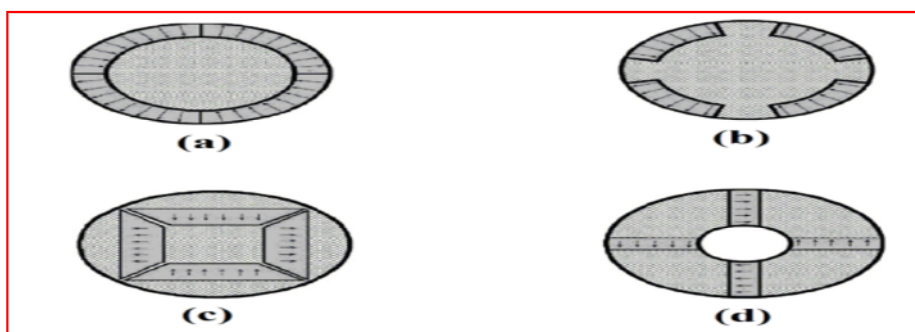
On trouve dans la grande majorité des applications à vitesse variable, trois catégories de machines synchrones qui sont :

### II.2.2.1 Machines synchrones à aimants permanents

Elles sont de plus en plus employées depuis une dizaine d'années avec l'apparition d'aimants rigides performants (ferrites, terres rares-cobalt et, plus récemment, néodyme-fer-bore). L'utilisation des aimants pour l'excitation des machines synchrones a été d'abord limitée à la réalisation de machines de faible alésage. Actuellement, l'augmentation de la taille de ce type de machines est sérieusement envisagée. En effet, à condition de coupler cette augmentation de taille avec une augmentation du nombre de pôles, l'utilisation des aimants reste avantageuse.

Des réalisations particulièrement intéressantes commencent à voir le jour dans le domaine des moyennes et fortes puissances (100 kW et plus), à des vitesses faibles (quelques centaines de tours par minute). Les machines synchrones à aimants présentent, en fonctionnement, des pertes au rotor faibles, mais leur inconvénient principal provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation [21].

La figure II.2 nous décrit les différentes conceptions des machines synchrones à aimants permanents.



**Figure II.2 :** Différentes dispositions d'aimants permanents dans un rotor

### II.2.2.2 Machines synchrones à rotor bobiné

Ces machines font appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et il est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse (30 MV et 30 000 tr/min par exemple), on utilise un rotor cylindrique massif [22].

➤ **Rotor à pôles lisses** : Ce sont les rotors des alternateurs de centrales nucléaires ou thermiques.

Il peut tourner à des vitesses importantes (3000tr/min). Ils sont généralement bipolaire ( $p= 1$ ) ou tétra-polaire ( $p=2$ )[23], Figure II.3.a.

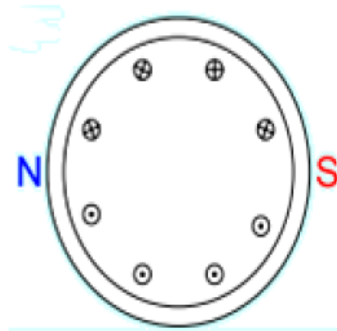


Figure II.3.a : Rotor à pôles lisses [22.1].

➤ **Rotor à pôles saillants**: Ce sont les rotors des machines fonctionnant dans les centrales hydrauliques. Ils tournent plus lentement mais il comporte un grand nombre de pôles (exemple : 40 pôles ;  $p= 20$ ) [23], Figure II.3.b.

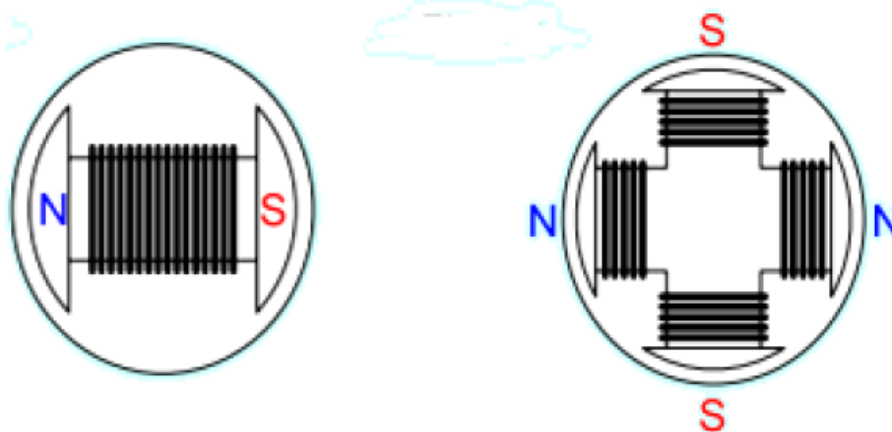
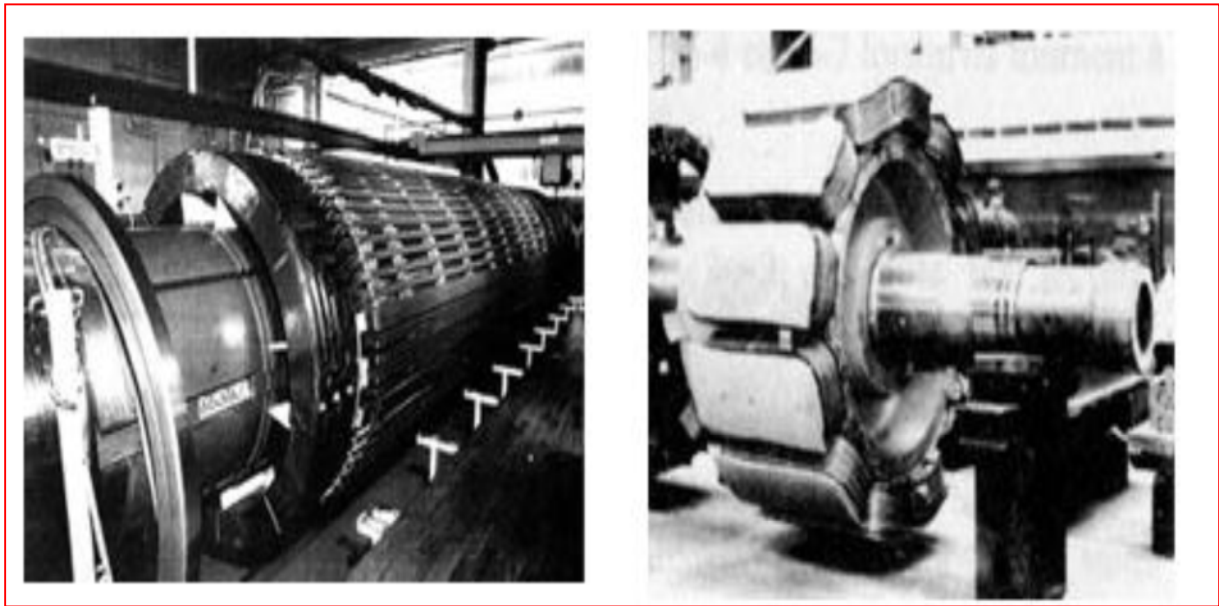


Figure II.3.b : Rotor à pôles saillants. [22.1].



**Figure II.4 :**Machine synchrone à pôles lisses et machine synchrone à pôles saillants

### II.3 Excitation des machines synchrones

Les alternateurs qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique ou vice versa (les moteurs synchrones) nécessitent une alimentation en courant continu de leur inducteur ou un système d'excitation. En outre, l'existence de ce dispositif permet, suivant les cas, de régler la tension et la puissance réactive de la machine synchrone. On peut distinguer trois grandes catégories de sources principales d'excitation [23] :

- Excitatrice à courant continu
- Excitateur-alternateur débitant sur redresseur
- Une auto-excitation

#### II.3.1 Excitatrices à courant continu

Parmi ces excitatrices, La figure (II.5) nous décrit l'un des schémas électrique d'une excitatrice à courant continu. Elle est munie d'un enroulement d'excitation séparée ( $L_{sep}$ ) par lequel seront obtenues les variations du flux permettant la variation de sa tension aux bornes ( $V_f$ ). Cette excitatrice est munie d'un enroulement d'auto-excitation en dérivation ( $L_d$ ) dans le but de diminuer l'importance de la source d'alimentation via un système intermédiaire formé de bagues et de balais le courant  $I_f$  est nécessairement transféré au rotor de la machine synchrone [23].

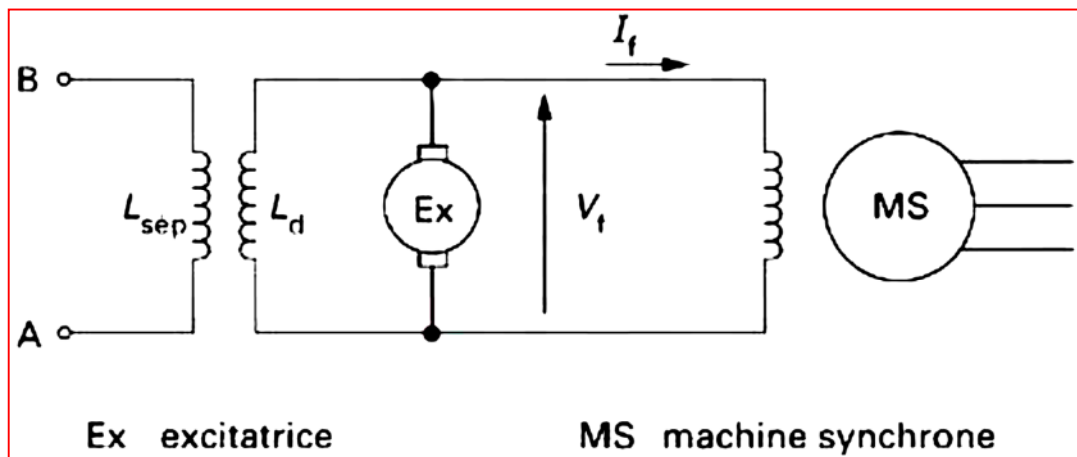


Figure II.5 : Principe de l'excitation par machine à courant continu

### II.3.2 Excitatrice-alternateur (sur redresseur)

Selon la conception classique il existe deux types d'excitatrices, suivant le mode de fonctionnement. Par fois, c'est l'inducteur qui tourne, l'induit est fixe, ou bien c'est l'inverse. La représentation schématique et la démarcation entre les éléments fixes et les éléments tournants sont données par la figure (II.6).

L'excitatrice est accouplée sur le même arbre de la machine principale, cet avantage est important pour l'excitation des alternateurs, dont le courant d'excitation atteint des valeurs élevées (plus de 3 000 A pour un alternateur de 600 MW). Cependant, la solution de la figure II.6.b est délicate constructivement, c'est qu'il est plus difficile de faire tourner un induit qu'un inducteur, car le premier supporte des tensions et des courants sont beaucoup plus élevés, et la rotation des redresseurs à grande vitesse est soumise à des contraintes mécaniques importantes.

C'est pour ces raisons que ces solutions sont utilisées à l'heure actuelle pour l'excitation des très gros turbo-alternateurs [23].

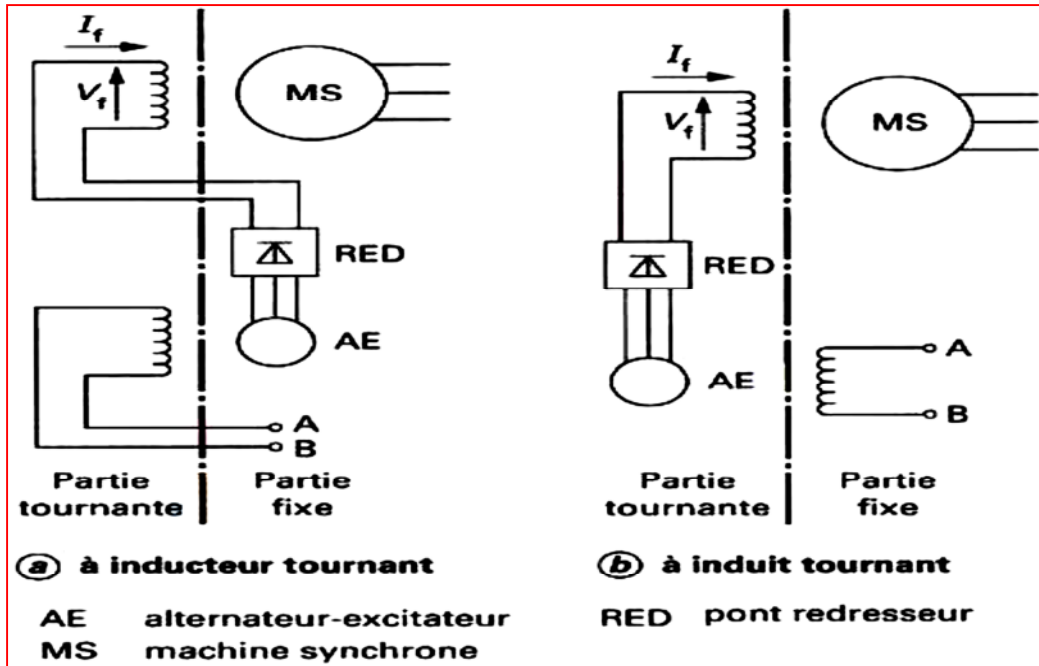


Figure II.6 : Principe de l'excitation par alternateur-excitateur

### II.3.3 Auto-excitation

Le pont à thyristors alimente l'enroulement inducteur, qui est lui-même alimenté par le même système de tensions alternatives par le secondaire d'un transformateur triphasé dont le primaire est connecté aux bornes de la machine synchrone principale, figure II.7. Dans ce cas, le réglage de la tension continue aux bornes de l'inducteur se fait par le choix des redresseurs à thyristors, et non à diodes, de façon à pouvoir faire varier la tension ( $V_f$ ) en fonction de la charge, de telle sorte que la tension aux bornes de la machine synchrone reste constante.

En général, la tension, due au flux rémanent de la machine principale, est trop faible pour permettre l'amorçage (compte tenu de la chute de tension dans les thyristors) et il faut donc utiliser une source auxiliaire [23].

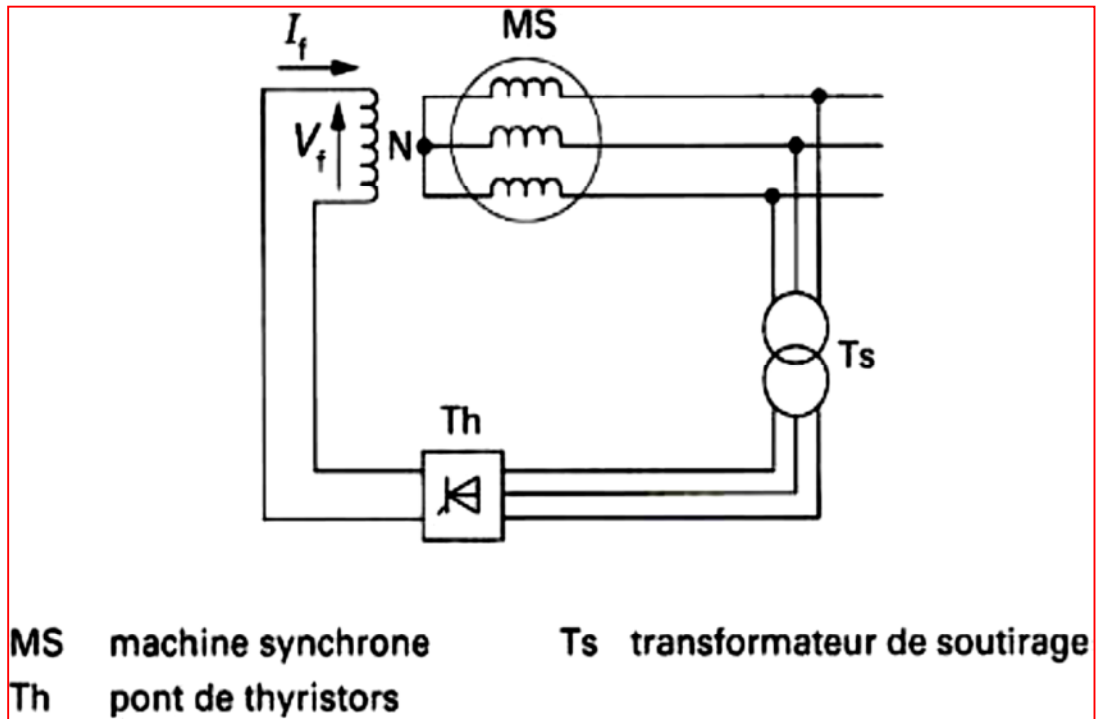


Figure II.7 : Principe de l'auto-excitation à dérivation pure

#### II-4 Présentation d'un l'alternateur

Les alternateurs des centrales sont des machines synchrones à pôles lisses avec enroulement triphasé au stator, et excitation au rotor.

L'alternateur est accouplé avec la turbine par un arbre intermédiaire. L'énergie disponible à l'arbre de la turbine est communiquée à l'alternateur qui réalise la transformation sous forme d'énergie électrique [24].

Comme toutes les machines tournantes, l'alternateur comporte essentiellement deux enroulements:

- L'enroulement induit dit statorique.
- L'enroulement inducteur dit rotorique.

II.4.1 Les composants de l'alternateur

Le plan de la coupe de la figure(II.8) permet d'identifier les organes principaux d'un turboalternateur [24].

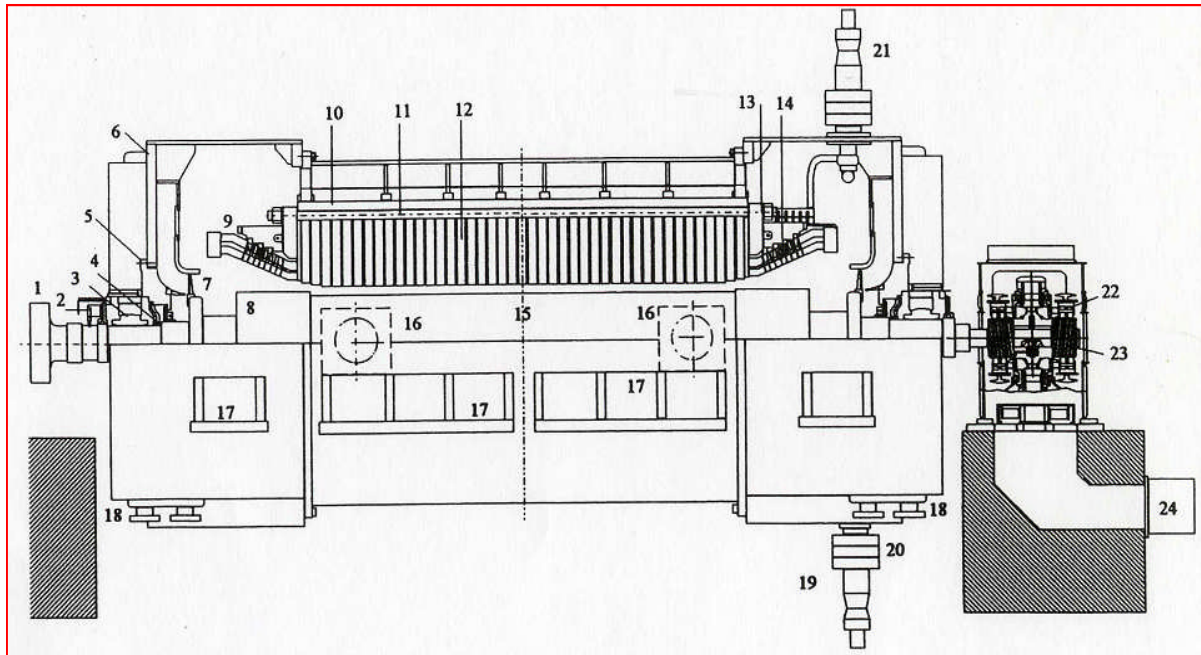


Figure II.8 : coupe transversale de l'alternateur

1	Bride d'accouplement	9	Têtes enroulement stator	17	Pieds d'appui
2	Mise à masse de l'arbre	10	Montage élastique du noyau	18	Réfrigérants hydrogène
3	Palier	11	Tirants du paquet	19	Traversées inférieurs
4	Etanchéité hydrogène	12	Noyau magnétique	20	Transformateurs de courant
5	Flasque palier	13	Plateau de serrage noyau	21	Traversées supérieurs
6	Carcasse	14	Support têtes stator	22	Balais
7	Ventilateurs	15	Corps rotor	23	Bagues collectrices
8	Frette de blindage	16	Tourillons	24	Filtre air chambre bagues

#### **II.4.1.1 Le stator**

Le stator d'un alternateur comprend essentiellement :

- une carcasse
- un circuit magnétique encoché
- un enroulement

##### **II.4.1.1.1 La carcasse (ou enveloppe métallique)**

La structure du stator des alternateurs est souvent conditionnée par la solution adoptée pour le transport. La solution la plus fréquente comporte une carcasse monobloc autoportante, permettant de supporter le poids des parties actives internes. Le stator est l'unité la plus lourde et la plus rigide de l'alternateur. La carcasse qui, en plus de son rôle de support du circuit magnétique, constitue l'enveloppe étanche à l'hydrogène doit être conçue pour éviter une déformation en cas d'explosion.

##### **II.4.1.1.2 Le circuit magnétique encoché**

Le circuit magnétique du stator étant traversé par un champ tournant. Afin de réduire les pertes par hystérésis et par courant de Foucault dans cette partie active de l'alternateur, il faut que le circuit magnétique soit constitué d'un empilage de tôle mince, chaque couche de l'empilage est constituée de plusieurs segments.

Les tôles magnétiques ont une épaisseur de 5mm au silicium à haute résistivité, isolées entre elles par des dépôts de vernis. Le circuit magnétique est fortement serré axialement par des tirants et la forme de ses extrémités doit être soigneusement étudiée pour éviter que les franges de lignes de champ frontales provoquent dans certains fonctionnements. La chaleur dégagée par le circuit magnétique est évacuée par des canaux axiaux qui résultent de la division axiale de l'empilage en plusieurs paquets de tôle.

##### **II.4.1.1.3 Suspension élastique**

Afin d'assurer le fonctionnement le plus silencieux possible en évitant de transmettre aux fondations les vibrations du circuit magnétique, celui-ci est fixé dans la carcasse par l'intermédiaire d'une suspension élastique qui, par sa flexibilité radiale, affaiblit l'amplitude des vibrations transmises à la carcasse.

**II.4.1.1.4 L'enroulement (ou bobinage)**

L'enroulement des alternateurs est parmi les plus simples, c'est un enroulement imbriqué comportant généralement un nombre entier assez élevé d'encoches par pôle et par phase.

L'encoche contient deux barres dont chacune est composée d'un nombre de conducteur élémentaire (pleins et creux), les brins conducteurs sont tressés, avec une torsion de 360° dans la partie située dans le fer, afin d'annuler les inégalités de tension induite entre le haut et le bas de l'encoche. La structure des barres est conditionnée par le mode de refroidissement utilisé (interne par eau dans notre cas). Le courant statorique parcourant la barre se répartit, donc, presque uniformément sur l'ensemble de la section de la barre, ce qui se traduit par une diminution des pertes supplémentaires dépendant du courant.

**II.4.1.1.5 L'Isolation**

L'isolation de l'enroulement des alternateurs est réalisée par un enrubannage sur toute la longueur des barres conductrices, Le ruban utilisé contient du mica constituant la barrière diélectrique principale entre conducteurs, ce mica est employé soit sous forme de support du ruban est généralement un tissu de verre. Ce ruban peut être soit injectée dans l'isolation posée sèche sur les barres (procédé par imprégnation), soit incorporée au ruban avant la pose (procédé par ruban pré imprégné). La surface extérieure de l'isolation est recouverte d'une peinture légèrement conductrice dans la partie située dans le fer des barres, afin de fixer à la masse le potentiel électrique externe de l'isolation, sans toutefois permettre le passage d'un courant dangereux entre les tôles. La classe d'isolation (F : 155 °C) a peu de signification pour les enroulements refroidis par eau puisque leur température ne dépasse pas 80°C, d'autres critères, surtout mécaniques, sont beaucoup plus importants, telle que, les forces électromagnétiques qui se produisent dans certains phénomènes transitoires, et qui provoquent la destruction des enroulements. De ce fait, il faut bien fixer les enroulements dans l'encoche.

**II.4.2.1 Le rotor**

Le rotor de l'alternateur est composé de :

**II.4.2.1.1 Arbre du rotor**

Le rotor se présente sous forme d'un cylindre de diamètre limité et de longueur conditionnée par la puissance. Pour les turboalternateurs à 2 pôles, à 3 000 tr/min, la

solution monobloc est très généralement utilisée, c'est celle qui conduit au niveau de vibration le plus faible. La masse de la pièce à forger reste dans des limites courantes qui permettent d'obtenir une pièce très saine. L'arbre du rotor se compose d'une partie active sur  $2/3$  de sa circonférence d'encoche longitudinale de façon à former deux pôles massifs opposés. Les extrémités de l'arbre sont usinées en forme de bride, peuvent ainsi assurer l'accouplement du rotor de l'alternateur à la turbine et à l'excitatrice.

#### **II.4.2.1.2 L'enroulement inducteur**

L'enroulement inducteur se compose de plusieurs bobines logées dans les encoches longitudinales dans la partie active du rotor. Les bobines sont montées en série, et enroulées de façon à constituer deux pôles. Chaque conducteur est centré pour former une demi-spire dans lesquelles sont logées dans les encoches du rotor, puis assemblées pour former les spires inductrices. Les têtes de bobines sont calées entre elles au moyen des pièces isolantes de façon à éviter tout déplacement inadmissible des bobines [21].

#### **II.4.2.1.3 L'amortisseur**

L'amortisseur est un organe qui n'a pas d'utilité en service normal il n'intervient qu'au cours de certains fonctionnements anormaux tels que la marche asynchrone temporaire après rupture de synchronisme, le fonctionnement permanent sur charge non équilibrée sur les trois phases, les oscillations, les courts-circuits biphasés. Pendant ces fonctionnements, l'amortisseur permet la circulation des courants induits au rotor par les champs magnétiques non synchrones, assurant la protection du rotor en évitant de faire passer ces courants par des contacts mécaniques délicats tels que celui entre frettes et fût. Il permet, ainsi, de mieux supporter ces régimes anormaux. L'amortisseur est constitué d'une cage formée par des conducteurs en cuivre, disposés sous les cales d'encoches du rotor. Il est fermé aux extrémités par un anneau de court-circuit, le contact électrique entre les différents éléments de l'amortisseur est assuré par la force centrifuge s'exerçant sur des surfaces préalablement argentées [25].

#### **II.3.2.1.4 Frette**

Le contenu électrique du rotor (c'est-à-dire les bobinages de l'inducteur et l'amortisseur, leur isolation et leur calage) n'a évidemment aucune capacité d'auto résistance à la force d'éclatement centrifuge et doit donc être accroché sur le rotor par un ensemble de pièces de maintien, les cales de fermeture d'encoche et les frettes d'extrémité, doivent pouvoir supporter les efforts de cet force. Ces frettes sont amagnétiques et sont fixées

(figure II.7) en porte à faux sur le bord du fût du rotor, une fixation double sur le fût d'un côté et sur l'arbre de l'autre étant déconseillée pour les grands rotors à cause de la déformation de flexion alternée de l'arbre entre ces deux appuis [25].

#### II.4.2.1.5 Les cales

Les cales sont constituées d'un métal de haute limite d'élasticité et amagnétique (bronze, alliages d'aluminium, etc.) pour ne pas créer une dérivation de flux nuisible, ces cales assurent aussi d'autres fonctions, elles assistent généralement la cage d'amortisseurs en portant une partie des courants induits, la déchargeant ainsi partiellement. Le métal qui les constitue doit donc posséder une résistivité électrique de préférence faible. Outre ces fonctions, les cales d'encoches doivent permettre le passage du gaz de refroidissement du rotor ; elles sont donc perforées dans les zones d'évacuation de gaz. Dans le cas des systèmes de refroidissement *pick-up* (ou à prise de gaz dans l'entrefer). Les connexions frontales des enroulements de l'inducteur et de l'amortisseur sont frettées par des cylindres en acier à très haute résistance constitua le métal le plus noble employé [25].

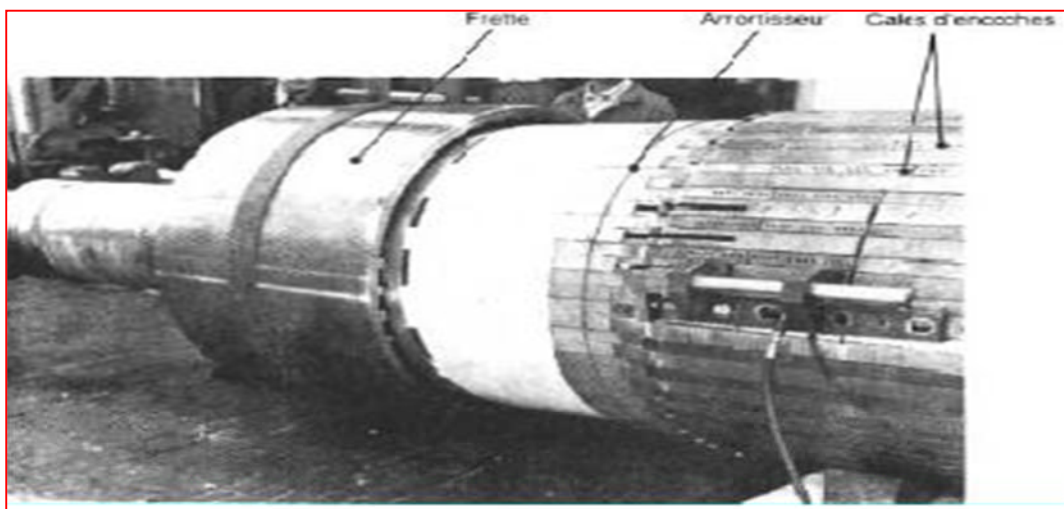


Figure II.9 : Amortisseur, frette et cale d'encoche.

#### II.4.2.1.6 Paliers et étanchéités

L'arbre du rotor est logé dans des paliers lisses à graissage par circulation d'huile sous pression, généralement du type palier-flasque, les paliers sont raccordés au dispositif hydraulique de soulèvement d'arbre de la turbine afin de réduire le couple de rotation lors du démarrage, les coussinets sont du type à patins séparés permettant de réduire un peu les

perles et assurant une stabilité accrue aux grandes vitesses périphériques. Les joints d'étanchéité à l'hydrogène de l'arbre sont intégrés dans le corps du palier et utilisent la même huile, soit en un seul circuit. Pour les démarrages et les arrêts, une injection d'huile sous une pression est utilisée pour assurer le soulèvement et la formation du film aux basses vitesses. Un des coussinets est électriquement isolé de la carcasse pour éviter la circulation de courants parasites, entre arbre et carcasse, risquant de détériorer les coussinets et les soies d'arbre (ou portées d'arbre).

**II.4.3 Principe de fonctionnement**

L'alternateur produit des courants alternatifs dont la fréquence est donnée par la formule suivante :

$$f = n.p \text{ [Hz]} \dots\dots\dots[1]$$

f : Fréquence de rotation [Hz].

P : Nombre de paire de pôles.

n : Vitesse de rotation [tr/s].

La rotation de l'inducteur revient à la rotation de la vectrice induction magnétique B, à la vitesse w, qui induit un flux variable dans le bobinage statorique, donc une f.é.m. à ces bornes.

$$\vec{\Phi} = \vec{B} \cdot \vec{S} = B.S \cos(\theta)$$

$$e = - \frac{n.d.\Phi}{dt} \quad \text{Avec :}$$

e : force électromotrice.

n : nombre de conducteurs.

L'inducteur est constitué par un électro-aimant et l'induit se compose de trois bobines décalées de 120°. Le passage des courants dans les enroulements, crée une f.é.m. tournante de vitesse  $\Omega = \frac{\omega}{p}$  de même vitesse que le rotor. L'interaction entre les deux pôles de l'induit et l'inducteur produit le couple électromagnétique qui freine le rotor permettant ainsi, la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique [26].

#### II.4.4 Refroidissement de l'alternateur

Même si le rendement des alternateurs est excellent les puissances dissipées sous forme de pertes joules sont énormes et ceci dans un volume limité. Il est donc nécessaire de mettre en place des systèmes d'évacuation des calories basés sur l'utilisation de fluides caloporteurs circulants dans le stator, dans le rotor ainsi que dans les conducteurs statoriques. Le schéma de refroidissement d'un alternateur est donné ci-dessous [26][27].

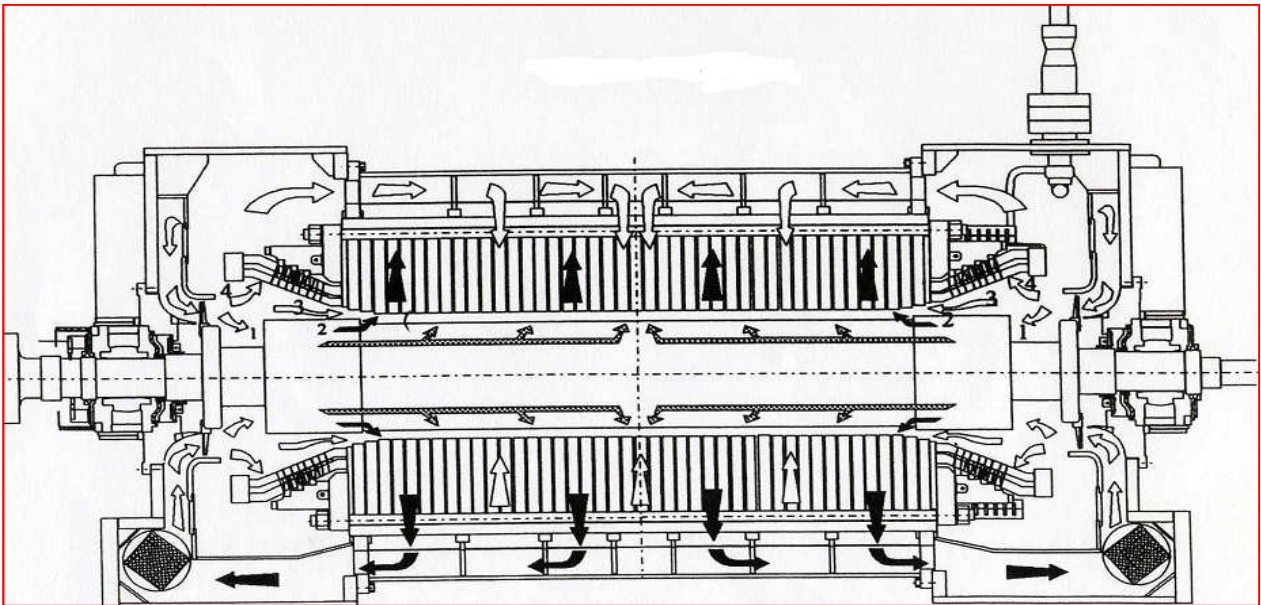


Figure II.10 : schéma des circuits d'hydrogène

Le schéma représente la circulation d'hydrogène sous pression qui à son tour cède la chaleur aux réfrigérants (échangeur hydrogène-eau).

#### II.4.5 Alternateur sur le réseau

Un alternateur est souvent relié à un réseau général constitué par l'interconnexion de nombreuses centrales et de très nombreux utilisateurs. C'est alors le réseau qui impose la fréquence et la valeur efficace du système des tensions.

**II.4.5.1 : le couplage**

La manœuvre de couplage de l'alternateur sur le réseau ne peut se faire que si quatre conditions sont remplies :

- L'ordre de succession des phases est identique pour la machine synchrone et le réseau.
- La fréquence des forces électromotrices induites dans l'alternateur est égale à la fréquence des tensions de réseau, ce qui est obtenu par le réglage de la vitesse d'entraînement de la machine.
- La valeur efficace des forces électromotrices induites dans l'alternateur est égale à la valeur efficace des tensions de réseau, ce qui, est obtenu par le réglage du courant d'excitation de la machine.
- La phase des forces électromotrices induites dans l'alternateur est égale à la phase des tensions du réseau, ce qui, est obtenu en agissant sur l'entraînement de la machine afin d'ajuster la position instantanée du rotor.
- Si ces conditions sont bien remplies, aucun courant n'est échangé entre l'alternateur et le réseau.

**II.4.6 : Groupe d'excitation**

Pour fonctionner un turboalternateur, on doit faire appel à une source d'énergie externe. L'excitatrice remplit cette fonction. Il s'agit d'un accouplement mécanique du rotor de l'induit d'une excitatrice principale triphasé à l'inducteur de turboalternateur, par l'intermédiaire d'un pont à diode fixé sur le même arbre, qui alimente les enroulements inducteurs de l'alternateur par du courant continu. L'excitatrice principale est excitée par une excitatrice pilote à aimant permanent [26].

**II.3.6.1 : Description du groupe d'excitation**

Dans la majorité des groupes et system d'excitation, l'ensemble est constitué d'une génératrice à aimant permanent (PMG), d'une excitatrice synchrone et d'un pont redresseur tournant.

Le groupe d'excitation est décrit par la figure (II.11).

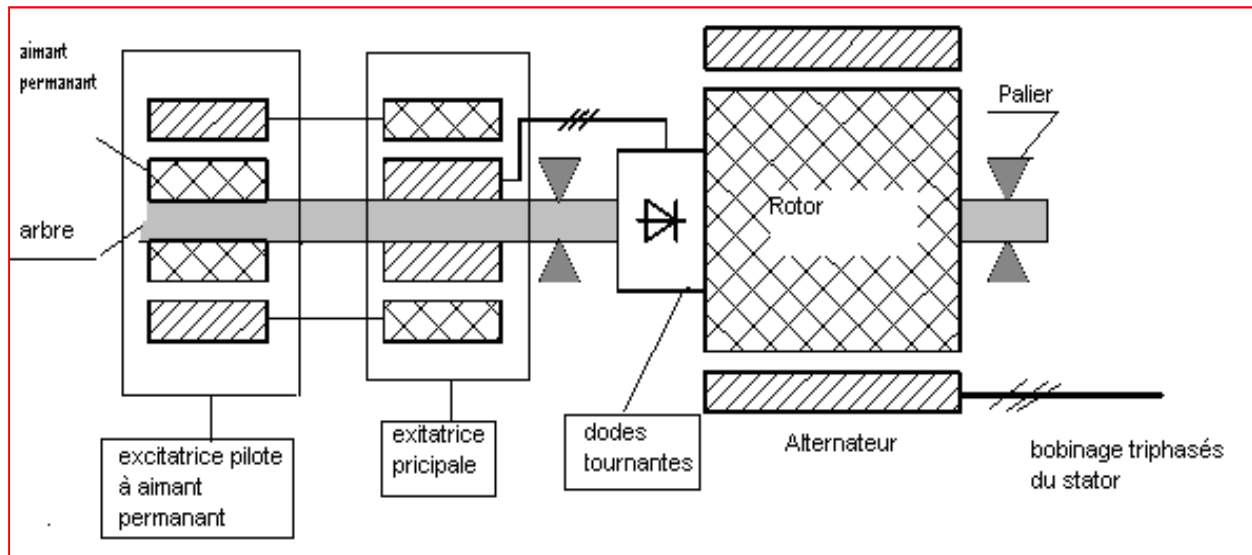


Figure II.11 : Groupe d'excitation.

#### II.4.6.1.1 Excitatrice pilote triphasée

L'excitatrice pilote triphasée est un alternateur à plusieurs paires de pôles dans le stator, ce dernier est constitué de tôle magnétique et de l'enroulement triphasé. Le rotor est constitué par la roue polaire et les pôles saillants, dont chaque pôle se compose d'un aimant permanent [26].

#### II.4.6.1.2 : Excitatrice principale triphasée

L'excitatrice principale est un alternateur triphasé à inducteur fixe (stator). L'inducteur abrite les pôles de l'enroulement inducteur et l'enroulement amortisseur. Ce dernier est constitué par des barres logées à la surface des épanouissements polaires. L'enroulement induit est logé dans les encoches du rotor. La tension triphasée induite dans le rotor est redressée par des diodes, permettant de fournir le courant d'excitation à l'alternateur [26].

#### II.4.6.1.3 : Roue à diode

Actuellement on utilise des systèmes d'excitation sans balais dans lesquels on trouve un alternateur exciteur et un groupe de redresseur (roue à diode). La roue à diode est constituée de diodes au silicium protégées par des fusibles formant ainsi un pont triphasé à

diode. Afin d'éviter les brèves pointes de tensions de commutation, les roues sont équipées de circuit RC.

#### **II.4.6.2 Refroidissement du groupe d'excitation**

Le groupe d'excitation est refroidi par air en circuit fermé, l'air chaud est refroidi à son tour dans deux réfrigérants disposés en partie haute du groupe d'excitation. Le ventilateur est monté sur l'arbre du groupe, l'air froid est envoyé immédiatement à l'excitatrice grâce à une configuration adéquate de l'enveloppe. Les roues à diodes sont entourées d'une enveloppe et s'auto-ventilent grâce à un guidage approprié de l'air.

L'excitatrice pilote se trouve sur le trajet de l'air de refroidissement mis en circulation par le ventilateur, comme il n'a besoin que d'une petite quantité d'air de refroidissement, aucune communication spéciale n'est prévue entre cette excitatrice et la zone d'air chaud.

Un système de ventilation de secours est prévu pour éviter tous risques d'arrêt du groupe d'excitation en cas de défaillance des réfrigérants [26].

## **II.5 conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit généralement tous les équipements de l'ensemble turbine-alternateur, ainsi que, leur principe de fonctionnement.

Le turbo-alternateur est l'accouplement d'une turbine et d'un alternateur en vue de transformer la puissance mécanique en puissance électrique.

La turbine est composée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Elle comprend une admission de vapeur et un échappement. La vapeur entre dans la partie admission avec une température élevée (jusqu'à 680 °C pour certaines machines) et une pression élevée (jusqu'à 250 bars pour les plus grosses turbines). C'est que l'on appelle la source chaude.

Le rotor de la turbine possède une ou plusieurs roues. Ces roues sont portées par des ailettes qui vont être traversées par la vapeur. En traversant les ailettes, la vapeur va les pousser et leur imposer un mouvement de rotation. La vapeur va fournir une partie de l'énergie thermique qu'elle possède au rotor et donc baisser en pression et en température. Donc à la

sortie de la dernière roue, on aura la pression et la température basse et plus elles seront basses et plus le rotor aura récupéré l'énergie mécanique nécessaire à faire tourner l'alternateur auquel il est couplé.

Dans l'alternateur le courant électrique sera généré dans le stator (partie fixe). Le champ magnétique est créé par le rotor (partie mobile), la variation est sa réaction est assurée par la rotation du rotor. Le rotor est composé de bobines traversées par un courant électrique continu. Ce courant est généré par l'excitatrice.

Selon l'intensité du courant générée par l'excitatrice on pourra faire varier les caractéristiques du courant produit par l'alternateur (puissance, tension).

Dans ce qui suit, nous allons donner une représentation détaillée des principaux éléments, par le développement des équations mathématiques, dans le but de modéliser et puis simuler le système globale constitué d'une turbine, d'un alternateur, disjoncteurs, charges et l'ensemble des dispositifs de contrôle et de commande.

# ***CHAPITRE II***

# ***CHAPITRE III***

### **III.1 Introduction**

La modélisation du comportement dynamique des machines tournantes est une pratique courante depuis de nombreuses années. Habituellement, l'objectif d'une telle modélisation consiste à donner le modèle mathématique des caractéristiques de la machine synchrone et de l'ensemble turbo-alternateur.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la machine synchrone et d'un système turbine-alternateur (générateur synchrone).

Une description détaillée des principaux éléments est faite, par le développement des équations et de modèle mathématique, dont nous avons commencé par la machine synchrone, fonctionnant en générateur, qui est connue souvent sous le nom d'alternateur.

Cette machine synchrone dans notre cas est à pôles lisses, entraînée par une turbine à vapeur.

### **III.2 Modélisation de la machine synchrone**

Comme toute machine électrique, la machine synchrone peut être modélisée sous formes d'équations mathématiques, s'exprimant en fonction des courants, des tensions et des flux de chaque enroulement.

#### **III.2.1 Hypothèses simplificatrices**

Pour la mise en équation du modèle de la machine synchrone permettant l'étude de son comportement en régime dynamique, nous avons retenu les hypothèses simplificatrices suivantes :

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé est parfaitement feuilleté ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteur, induit, amortisseurs) sont parcourus par des courants.

- On admettra que l'ensemble des amortisseurs peut être représenté par deux enroulements amortisseurs d'axe direct dirigé selon l'axe ( $o_d$ ), l'autre en quadrature dirigé suivant l'axe ( $o_q$ ).
- Tous les harmoniques d'espaces dans les expressions des forces magnétomotrices sont négligés. Cela revient à considérer les inductances et les mutuelles comme la somme d'une valeur constante et d'un terme sinusoïdal éventuel dépendant de la position du rotor par rapport au stator.[27] [28]

### **III.2.2 Définition des axes**

Les axes ( $o_d, o_q$ ) sont dites successivement l'axe direct et l'axe en quadrature. La vitesse de rotation et les angles mécaniques, électriques sont liés par les formules ;  $\omega_r = \omega / p = 2\pi \cdot f / p$  ; soit  $\theta_{mec} = \theta_{elec} / p$  , avec  $p$  est le nombre de paires de pôles de la machine.

Les enroulements ( $D, Q$ ) sont liés au rotor, ils représentent les amortisseurs dus à la structure massive du rotor.

Les axes ( $Oa, Ob$  et  $Oc$ ), sont respectivement les axes des enroulements a, b et c du stator.

La figure III-1 est le circuit représentatif d'un modèle idéal d'une machine synchrone communément utilisé pour les études de modélisation.

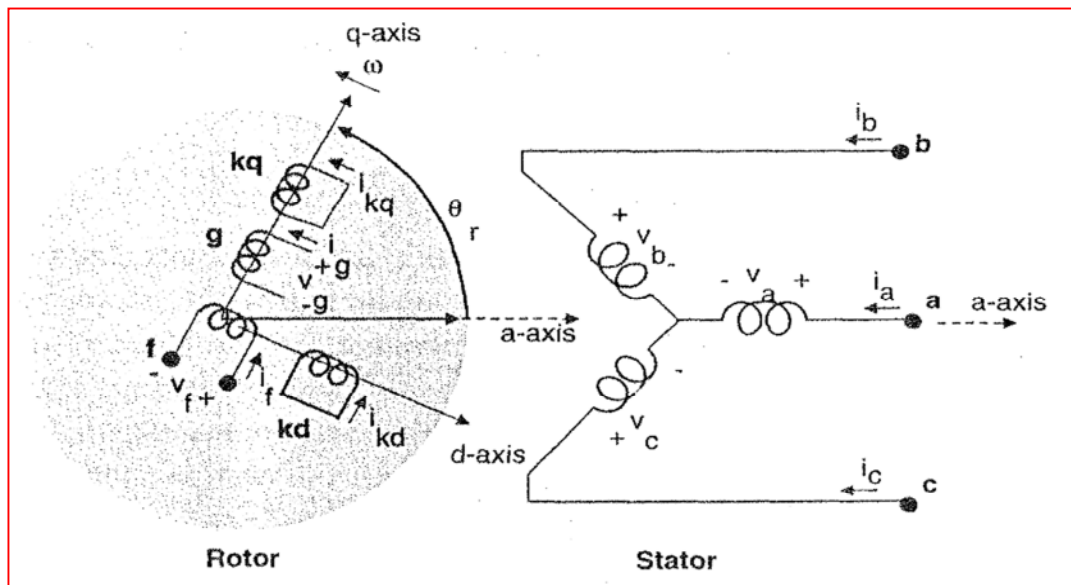


Figure.III.1 : Circuit représentatif d'une machine idéal

### III.3 Équations électriques

a- Les équations des tensions du stator :

$$\begin{cases} V_{as} = r_s i_{as} + \frac{d}{dt}(\phi_{as}) \\ V_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d}{dt}(\phi_{bs}) \dots \dots \dots (1) \\ V_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d}{dt}(\phi_{cs}) \end{cases}$$

Avec :  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$ ,  $V_{cs}$  et  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$ ,  $i_{cs}$  sont les tensions et les courants des enroulements statoriques,

b- Les équations des tensions du rotor :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_f = r_f i_f + \frac{d}{dt}(\phi_f) \\ V_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{d}{dt}(\phi_{kd}) \\ V_g = r_g i_g + \frac{d}{dt}(\phi_g) \\ V_{kq} = r_{kq} i_{kq} + \frac{d}{dt}(\phi_{kq}) \end{array} \right. \dots\dots\dots (2)$$

Avec :

$r_s$  : Résistance d'une phase de l'induit.

$r_r$  : Résistance d'une phase de l'inducteur.

$r_f$  : Résistance propre de l'enroulement d'inducteur d'axe d

$r_g$  : Résistance propre de l'enroulement d'inducteur d'axe q

$r_{kd}$  : Résistance propre de l'enroulement amortisseur d'axe d

$r_{kq}$  : Résistance propre de l'enroulement amortisseur d'axe q

### III.3.2 Équations magnétiques

Pour une phase du stator de la machine, l'équation du flux est :

$$\Phi_a = l_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c + M_{af} \cdot i_f + M_{aD} \cdot i_D + M_{aQ} \cdot i_Q \dots\dots (3)$$

Un même calcul a été effectué pour toutes les autres phases, on obtient ainsi le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \\ \Phi_F \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ab} & l_b & M_{bc} & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ac} & M_{bc} & l_c & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & l_f & M_{fD} & 0 \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} & M_{fD} & l_D & 0 \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} & 0 & 0 & l_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4)$$

a- Les équations du flux au stator sont données par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & l_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & l_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

b- Les équations du flux au rotor sont :

$$\begin{bmatrix} \Phi_F \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{af} & M_{bf} & M_{cf} \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_f & M_{fD} & 0 \\ M_{fD} & l_D & 0 \\ 0 & 0 & l_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \dots \dots \dots (6)$$

c- les matrices des flux reliant le stator et le rotor peuvent être écrite sous le système suivant :

$$\text{Flux} : \begin{cases} [\phi_s] = [L_{SS}][i_s] + [L_{sr}][i_r] \\ [\phi_r] = [L_{sr}]^t [i_s] + [L_{rr}][i_r] \end{cases}$$

Avec :

$$\text{Courants} : \begin{cases} [i_s] = [ias \ ibs \ ics]^t \\ [i_r] = [iar \ ibr \ ibr]^t \end{cases}$$

- L'expression de la matrice inductance statorique en fonction de  $\theta_r$  est donnée par :

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_o + L_{ms} \cos \theta_r - \frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{ls} + L_o - L_{ms} 2 \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi) \\ -\frac{1}{2}L_o - L_o \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_o - L_{ms} 2 \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \dots (7)$$

- Les éléments de la matrice inductance rotorique ne varie pas avec  $\theta_r$ , donc:

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lf} + L_{mf} & L_{fkd} & 0 & 0 \\ L_{fkd} & L_{lkd} + L_{mkd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lg} + L_{mg} & L_{gkd} \\ 0 & 0 & L_{kqg} & L_{lkq} + L_{mkq} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (8)$$

- L'expression de la matrice de couplage entre le stator et le rotor en fonction de  $\theta_r$  est donnée par :

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sf} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r & L_{sg} \cos \theta_r & L_{skq} \cos \theta_r \\ L_{sf} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sg} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sf} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sg} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (9)$$

Avec :

$L_{ls}$  : Inductance de fuite de stator

$L_{lf}$  : Inductance de fuite propre a l'enroulement inducteur d'axe d

$L_{lg}$  : Inductance de fuite propre a l'enroulement inducteur d'axe q

$L_{lkd}$  : Inductance de fuite de l'amortisseur dans l'axe d

$L_{lkq}$  : Inductance de fuite de l'amortisseur dans l'axe q

$L_{mf}$  : Inductance de magnétisation propre de l'enroulement d'axe d

$L_{mg}$  : Inductance de magnétisation propre de l'enroulement d'axe q

$L_{mkd}$  : Inductance de magnétisation propre des enroulements amortisseur d'axe d

$L_{mkq}$  : Inductance de magnétisation propre des enroulements amortisseur d'axe q

### III.3.3 Transformation de Park

Le modèle de la machine synchrone dans le repère (a, b, c) montre que les coefficients de la matrice inductance sont constants, on utilise généralement, une transformation dite de Park, cette transformation permet le passage de notre système réel triphasé à un autre système d'axe biphasés ( $o_d, o_q$ ), formant le référentiel de Park, lié au rotor et repéré par l'angle  $\theta$  par rapport au stator[29].

**a- Matrice directe de PARK :**

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(10)$$

**b- Matrice inverse de PARK :**

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(11)$$

Le coefficient  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  est donné pour une conservation de puissance instantanée.

Ces matrices sont les mêmes pour les grandeurs rotoriques et statoriques en spécifiant l'angle par l'indice (s) ou (r).

### III.3.4 Choix des différents repères

La transformation de Park se rattache à un système d'axes déterminé, il est primordial d'en recenser le privilège. Ceux-ci sont au nombre de trois, liés au stator, soit au rotor, soit aux champs tournants dans l'entrefer. Pour la Machine Synchrone, il paraît naturel de fixer la transformation par rapport au rotor [29].

Pour se placer dans ces repères privilégiés les angles de transformation sont fixes à :

Dans le cas d'un repère lié au rotor :

$$\Theta_s = \Theta \quad , \quad \Theta_r = 0$$

Dans le cas d'un repère lié au stator :

$$\Theta_s = 0 \quad , \quad \Theta_r = -\Theta$$

### III.4 Modèle de la machine synchrone dans le plan dqo

A travers les variables de la matrice  $[P(\Theta)]$  l'équation des tensions au stator de la machine synchrone devient :

$$V_s^{dqo} = [P(\theta_r)]r_s [P(\theta_r)]^{-1}[i_s^{dqo}] + [P(\theta_r)]\frac{d}{dt}[P(\theta_r)]^{-1}[\phi]_s^{dqo} \dots (12)$$

Sachant que :  $r_a = r_b = r_c = r_s$

Par substitution de l'équation (10) dans l'équation (1), on obtient :

$$[P(\theta_r)]r_s[P(\theta_r)]^{-1}[i_s^{dqo}] = r_s[i_s^{dqo}] \dots \dots \dots (13)$$

Le développement du deuxième terme de droite de l'équation (10) exprimant la variation des flux s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned}
 [P(\theta_r)] \frac{d}{dt} [P(\theta_r)]^{-1} [\phi_s^{dqo}] \\
 = [P(\theta_r)] \left\{ \frac{d}{dt} [(P(\theta_r))^{-1}] [\phi_s^{dqo}] + [P(\theta_r)]^{-1} \frac{d}{dt} [\phi_s^{dqo}] \right\} \dots (14)
 \end{aligned}$$

En simplifiant le premier terme de l'équation (12), toute en détaillant l'écriture matricielle on aura :

$$\frac{d}{dt} [P(\theta_r)]^{-1} [\phi_s^{dqo}] = \omega_r \begin{bmatrix} -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ -\sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & 0 \\ -\sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & 0 \end{bmatrix} [\phi_s^{dqo}] \dots (15)$$

Avec :

$$[P(\theta_r)] \frac{d}{dt} [P(\theta_r)]^{-1} [\phi_s^{dqo}] = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\phi_s^{dqo}] \dots \dots \dots (16)$$

Sachant que :  $\frac{d(\theta_r)}{dt} = \omega_r$

Le second terme de l'équation (12) se réduit à :

$$[P(\theta_r)] [P(\theta_r)]^{-1} \frac{d}{dt} [\phi_s^{dqo}] = \frac{d}{dt} [\phi_s^{dqo}] \dots \dots \dots (17)$$

Par substitution des équations (11), (16), (17) dans l'équation des tensions du stator dans le repère de Park, l'équation des tensions dans les axes d-q, s'écrit comme suit :

$$V_s^{dqo} = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\phi_s^{dqo}] + \frac{d}{dt} [\phi_s^{dqo}] + [r_s^{dqo}] + [i_s^{dqo}] \dots \dots \dots (18)$$

Avec :

$\frac{d}{dt} [\phi_s^{dqo}]$  : exprime la f.é.m. de transformation, qui est un terme relatif à la variation dans le temps.

$[\phi_s^{dqo}]$  : exprime la f.é.m. de rotation (variation de la position de rotor)

### III.4.1 L'équation des flux statorique dans le plan dqo

La correspondance entre les relations de flux  $[\phi_s^{dqo}]$  et les courants dans le plan **dqo** peut être obtenue par la transformation des équations du flux au stator comme suit :

$$\phi_s^{dqo} = [P(\theta_r)]L_{ss}[P(\theta_r)]^{-1}[i_s^{dqo}] + [P(\theta_r)]L_{sr}[i_r^{abc}] \dots \dots \dots (19)$$

### III.4.2 Établissement des équations électriques

En tenant compte des changements de variable des inductances propres et mutuelles de stator suivantes :

$$\begin{cases} \phi_q = \left\{ L_{ls} + \frac{3}{2}(L_o - L_{ms}) \right\} i_q + L_s i_g + L_{skq} i_{kq} \\ \phi_d = \left\{ L_{ls} + \frac{3}{2}(L_o + L_{ms}) \right\} i_d + L_{sf} i_f + L_{skd} i_{kd} \end{cases} \dots \dots \dots (20)$$

Les inductances du rotor de la machine synchrone sont :

$$\begin{cases} \phi_f = \frac{3}{2}L_{sf}i_d + L_{ff}i_f + L_{fkd}i_{kd} \\ \phi_{kd} = \frac{3}{2}L_{kd}i_d + L_{fkd}i_f + L_{kaka}i_{kd} \\ \phi_g = \frac{3}{2}L_{sg}i_q + L_{gg}i_g + L_{fkq}i_{kq} \\ \phi_{kq} = \frac{3}{2}L_{skq}i_q + L_{gkg}i_g + L_{kqkq}i_{kq} \end{cases} \dots\dots\dots (21)$$

D'après ces équations on remarque que les courants statoriques  $i_d, i_q$  ont un facteur de (3/2) qui rend le coefficient de la matrice inductance des enroulements **dqo** non symétrique .

Pour avoir la symétrie on applique le changement de variable suivant aux courants rotoriquess :

$$\begin{cases} \underline{i_f} = \frac{3}{2}i_f \\ \underline{i_{kd}} = \frac{3}{2}i_{kd} \\ \underline{i_g} = \frac{3}{2}i_g \\ \underline{i_{kq}} = \frac{3}{2}i_{kq} \end{cases} \dots\dots\dots (22)$$

Pour avoir l'équilibre magnétique des inductances pour les enroulements statoriques dans les axes **d** et **q**, on a remplacé les inductances  $L_{md}$  et  $L_{mq}$  dans l'équation (20) par :

$$\begin{cases} L_{md} = \frac{3}{2}(L_o + L_{ms}) \\ L_{mq} = \frac{3}{2}(L_o - L_{ms}) \end{cases} \dots\dots\dots (23)$$

$L_{mq}$  : Inductance de magnétisation de stator d'axe q

$L_{md}$  : Inductance de magnétisation de stator d'axe d

Par substitution des équations (17), (18), (19), (20), les équations des tensions dans les repères **dqo** du stator et du rotor sont données comme suit:

$$\text{Stator: } \begin{cases} V_q = r_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \phi_d \frac{d\theta_r}{dt} \\ V_d = r_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \phi_q \frac{d\theta_r}{dt} \dots \dots \dots (24) \\ V_o = r_s i_o + \frac{d\phi_o}{dt} \end{cases}$$

$$\text{Rotor: } \begin{cases} V'_f = r'_f i'_f + \frac{d\phi'_f}{dt} \\ V'_{kd} = r'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\phi'_{kd}}{dt} \dots \dots \dots (25) \\ V'_g = r'_g i'_g + \frac{d\phi'_g}{dt} \\ V'_{kq} = r'_{kq} i'_{kq} + \frac{d\phi'_{kq}}{dt} \end{cases}$$

Les expressions de la liaison des flux sont :

$$\text{Stator: } \begin{cases} \phi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_g + L_{mq} i'_{kq} \\ \phi_d = L_d i_d + L_{mq} i'_f + L_{md} i'_{kd} \dots \dots \dots (26) \\ \phi_o = L_{ls} i_o \end{cases}$$

$$\text{Rotor: } \begin{cases} \phi'_f = L_{md} i_d + L_{md} i'_{kd} + L'_{ff} i'_f \\ \phi'_{kd} = L_{md} i_d + L_{md} i'_f + L'_{kdkd} i'_{kd} \dots \dots \dots (27) \\ \phi'_g = L_{md} i_d + L_{md} i'_g + L_{mq} i'_{kq} \\ \phi'_{kq} = L_{mq} i_q + L_{mq} i'_g + L'_{kqkq} i'_{kq} \end{cases}$$

### III.4.3 Etablissement de l'équation du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est obtenue à partir de la puissance instantanée de la machine.

$$P_{in} = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c + V_f i_f + V_g i_g \dots \dots \dots (28)$$

Par le passage de la transformation de Park des tensions statoriques, vers un référentiel dqo lié au rotor, ou la vitesse de rotation est :  $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$ , l'équation de la puissance est :

$$P_{in} = \frac{3}{2}(V_q i_q + V_d i_d) + 3V_o i_o + V_f i_f + V_g i_g$$

$$P_{in} = \frac{3}{2} \left( r_s (i_q^2 + i_d^2) + i_q \frac{d\phi_q}{dt} + i_d \frac{d\phi_d}{dt} + \omega_r (\phi_d i_q - \phi_q i_d) \right) + 3i_o^2 r_o + 3i_o \frac{d\phi_o}{dt} + i_f^2 r_f + i_f \frac{d\phi_f}{dt} + i_g^2 r_g + i_g \frac{d\phi_g}{dt} \dots \dots \dots (29)$$

Cette puissance électrique développée par l'induit de la machine est composé de trois termes

:

$$P_{in} = P_j + P_{em} + P_{me} \dots \dots \dots (30)$$

**$P_{em}$**  : correspond à la variation de l'énergie magnétique emmagasiné par unité de temps.

**$P_{me}$**  : Puissance mécanique qui résulte de la transformation de la puissance instantané de la machine on aura la puissance électrique.

**$P_j$**  : Pertes joule

On néglige les pertes joule (les chutes ohmiques) dans l'expression de la puissance instantané de la machine on aura la puissance électromagnétique comme suit :

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega_r (\phi_d i_q - \phi_q i_d) \dots \dots \dots (31)$$

Pour une machine à P paire de pôles,  $\omega_r = \frac{P}{2} \omega_{rm}$  on aura :

$$P_{em} = \frac{3P}{2} \omega_{rm} (\phi_d i_q - \phi_q i_d) \dots \dots \dots (32)$$

Le couple électromagnétique de la machine est le rapport de la puissance sur la vitesse de rotation, l'expression du couple est donné par l'équation suivante.

$$\Gamma_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_m} = \frac{3P}{2} (\phi_q i_q - \phi_d i_d) \dots \dots \dots (33)$$

**III.4.4 Equation mécanique**

Par définition par l'équation mécanique de la machine synchrone est donnée par la formule suivante :

$$\Gamma_{em} + \Gamma_{mech} - \Gamma_{damp} = J \frac{d\omega_{rm}(t)}{dt} = \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r(t)}{dt} \dots \dots \dots (34)$$

*P* : Nombre de pôles

*Γ<sub>em</sub>* : Représente le couple électromagnétique

*Γ<sub>mech</sub>* : Représente le couple mécanique

*J* : Moment d'inertie des parties tournantes

**III.5. Modèle de simulation de la machine synchrone**

La simulation de notre machine se fera sur la base des équations définies précédemment ou celles-ci seront exprimées en unités réduites par unité. Pour cela on fait les changements suivants :

(Avec :  $\psi = \omega_b \phi$  et  $x = \omega_b L$  )

$$\begin{cases} \psi_q = \omega_b \int \left\{ V_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_q) \right\} dt \\ \psi_d = \omega_b \int \left\{ V_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_d) \right\} dt \dots \dots \dots (35) \\ \psi_o = \omega_b \int \left\{ V_o - \frac{r_s}{x_{ls}} \psi_o \right\} dt \end{cases}$$

$$\psi'_{kq} = \frac{r'_{kq} \omega_b}{x'_{lkq}} \int (\psi_{mq} - \psi'_{kq}) dt$$

$$\psi'_f = \frac{r'_{kd} \omega_b}{x'_{lkd}} \int (\psi_{md} - \psi'_{kd}) dt$$

$$\psi'_f = \frac{r'_f \omega_b}{x_{md}} \int \left( E_f + \frac{x_{md}}{x'_{lf}} (\psi_{md} - \psi'_f) \right) dt$$

Avec :

$$\psi_{mq} = \omega_b L_{mq} (i_q - i_{kq})$$

$$\psi_{md} = \omega_b L_{md} (i_q + i_{kd} + i'_f)$$

$$E_f = x_{md} \frac{V'_f}{r'_f} \dots \dots \dots (36)$$

A partir des expressions des flux mutuels on peut déterminer les courants :

$$\begin{cases} i_q = \frac{\psi_q - \psi_{mq}}{x_{ls}} \\ i_d = \frac{\psi_d - \psi_{md}}{x_{ls}} \\ i'_{kq} = \frac{\psi'_{kq} - \psi_{mq}}{x'_{lkq}} \dots \dots \dots (37) \\ i'_f = \frac{\psi'_f - \psi_{md}}{x'_{lf}} \end{cases}$$

D'après les équations (33) et (34) les flux mutuels s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \psi_{mq} = x_{MQ} \cdot \left( \frac{\psi_q}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{kq}}{x'_{lkq}} \right) \\ \psi_{md} = x_{MD} \cdot \left( \frac{\psi_d}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{kd}}{x'_{lkd}} + \frac{\psi'_f}{x'_{lf}} \right) \end{cases} \dots \dots \dots (38)$$

Couple électromagnétique :

$$\Gamma_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{\omega_b} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \dots \dots \dots (39)$$

Le couple électromagnétique en valeurs réduites s'écris :

$$\Gamma_{em}(pu) = \frac{T_{em}}{T_{emb}} = \frac{\frac{3}{2} \frac{p}{\omega_b} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)}{\frac{3}{2} \left( \frac{V_b I_b}{P} \right)} \dots \dots \dots (40)$$

On exprime  $\psi_d$  et  $\psi_q$  en unités réduite, sachant que lorsqu'on exprime le terme  $(\psi_d i_q - \psi_q i_d)$  par des variables en unités réduites, un produit  $V_b I_b$  apparait, le couple électromagnétique s'exprime donc :

$$\Gamma_{em} = (\psi_{d(pu)} i_{q(pu)} - \psi_{q(pu)} i_{d(pu)}) \dots \dots \dots (41)$$

En divisant l'équation mécanique par le couple de base, on obtient une équation mécanique dans la quelle la vitesse sera exprimée en unités réduites.

$$\Gamma_{em(pu)} + \Gamma_{mech(pu)} - \Gamma_{damp(pu)} = 2H \frac{d \left\{ \frac{\omega_r - \omega_e}{\omega_b} \right\}}{dt} \dots \dots (42)$$

Avec : 
$$\mathbf{H} = \frac{1}{2} j \frac{\omega_{bm}^2}{S_b} \quad \text{et} \quad \omega_{bm} = \frac{\omega_b}{P/2}$$

**H** : moment d'inertie .

**S<sub>b</sub>** : puissance apparente de base.

### **III.6 Modélisation de la turbine à vapeur**

Dans l'industrie de la pétrochimie, la majorité des turbines à vapeur sont conçues avec plusieurs extractions en pression, contrôlées et ou incontrôlées pour fournir de la vapeur à des différents niveaux d'exploitation et à la production d'énergie électrique. Les turbines sont entraînées par la vapeur produite par les chaudières, Leur système de régulation en vitesse est assuré par des vannes régulatrice, jouant un rôle essentiel, non seulement pour réguler la vitesse de sortie et la puissance de la turbine, mais aussi dans le réglage de la pression d'extraction.

### III.6.1 Description du Modèle

Une turbine à vapeur à double extraction est considérée pour l'approche de modélisation et simulation. Elle est d'une puissance de 13,8 MW, avec (03) compartiments de décontraction de la vapeur (HP, MP et BP), chaque entrée de compartiment, un actuateur valve est utilisé pour commander la vitesse/ puissance développée par la turbine, comme schématisé par la figure III.2.[29.1]

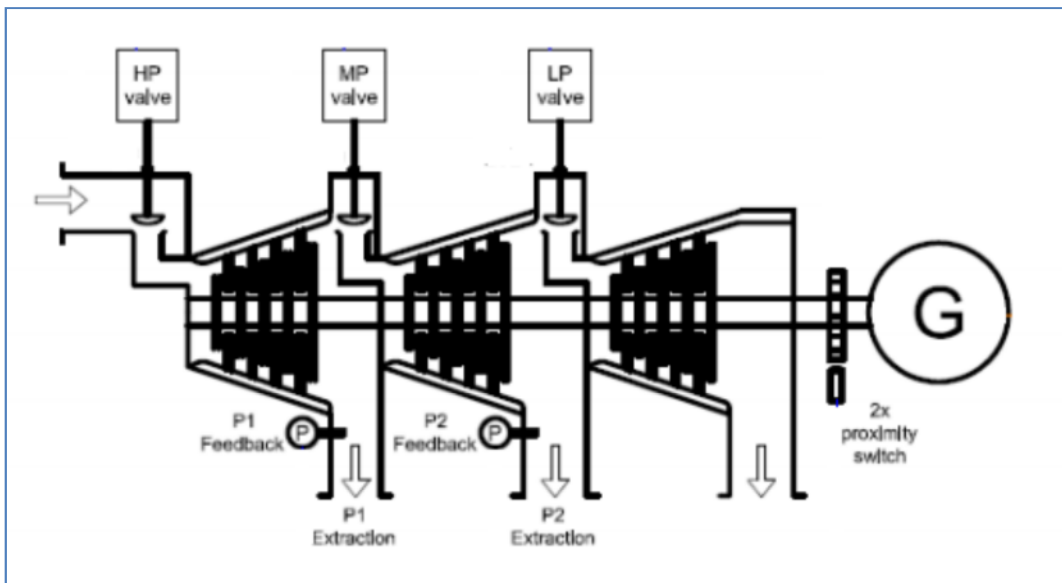
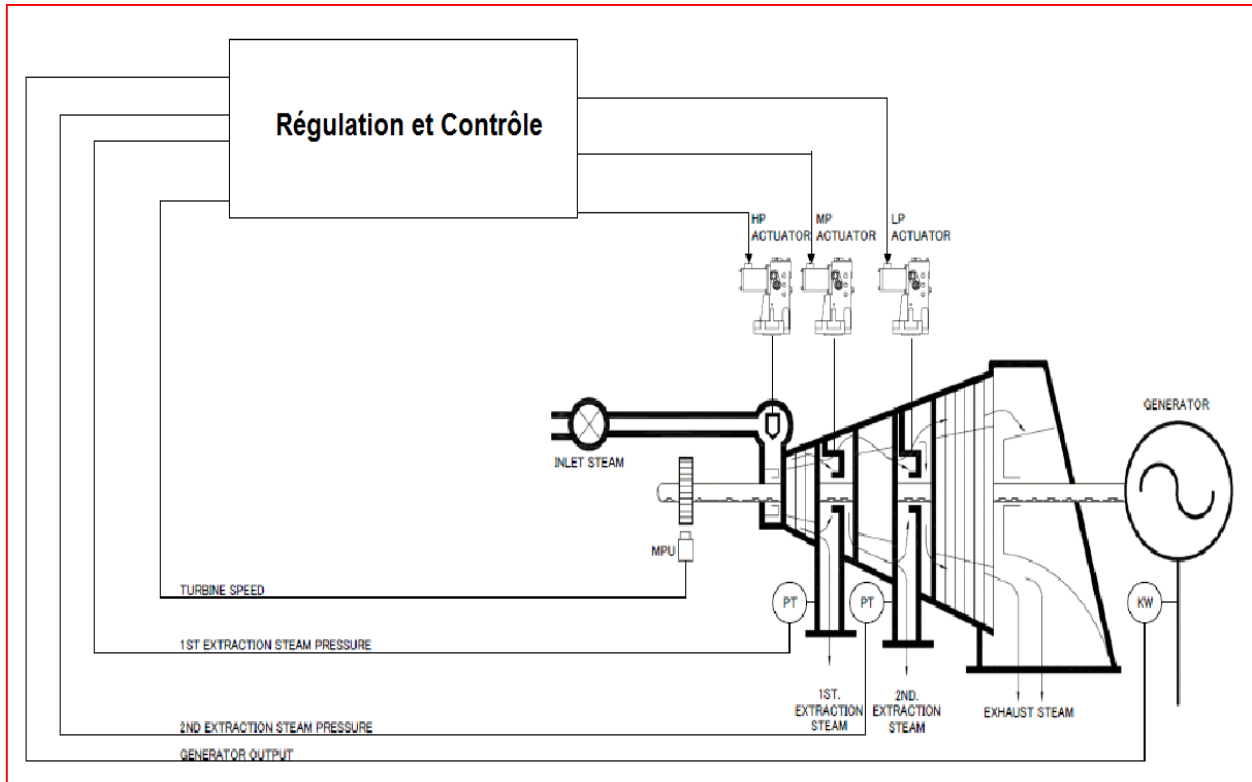


Figure III.2.a Schéma simplifié du principe d'une turbine à vapeur



**Figure III.2.b** : Schéma d'un system turbine -alternateur avec turbine à vapeur à doubles extractions et generateur synchrone

### III.6.2 Caractéristique du modèle

#### Corps HP

- A l'entrée du corps HP : Pression 35 kg/cm<sup>2</sup>g. Température 400°C.
- Première extraction HP : Pression 17 kg/cm<sup>2</sup>g. Température 328°C.

#### Corps MP

- A l'entrée du corps MP : Pression 17 kg/cm<sup>2</sup>g. Température 328°C.
- Deuxième extraction MP : Pression: 5 kg/cm<sup>2</sup>g. Température 245°C

#### Corps BP

- A l'entrée du corps BP : Pression 5 kg/cm<sup>2</sup>g. Température 245°C.
- A la sortie du corps BP vers le condenseur 0.05 kg/cm<sup>2</sup>g. Température 32.5°C

### III.6.3 Puissance de la turbine à double extraction

Il existe de nombreux modèles dynamiques des turbines à vapeur, basés sur des relations empiriques entre les variables d'entrée et sortie [30]. Suivant le point de fonctionnement, notre travail fera l'objet d'une identification d'un modèle approché assimilé à un modèle réel d'une turbine à vapeur à double extraction.

Par définition, la puissance mécanique développée par une turbine, égale au débit d'admission de vapeur dans chaque compartiment en multipliant par la variation de l'enthalpies entre l'entrée et la sortie de la turbine.

La puissance mécanique par définition pour une turbine à simple extraction est déterminée par l'équation suivante [31, 32]:

$$P_{mec} = \dot{m} \cdot (h_1 - \dots h_{n.ext}) \dots \dots \dots (43)$$

$\dot{m}$  : Débit de vapeur ;

$\Delta H$ : Enthalpie spécifique à l'entrée et à la sortie de la turbine

Les équations mathématiques entre le débit massique d'admission de vapeur en fonction de la différence de pression dans chaque compartiment sous l'effet de variation de température sont données par les équations suivantes [33], [34]:

$$\dot{m}_{in} = \frac{K}{\sqrt{T_{in}}} \sqrt{P_{in}^2 - P_{out}^2} \dots \dots \dots (44)$$

$$\frac{T_{out}}{T_{in}} = \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\left( \frac{K-1}{K} \right)} \dots \dots \dots (45)$$

$K$  : Constante obtenu par la dynamique de réponse de la turbine.

Par supposition de la linéarité d'expansion de la vapeur dans la turbine, on peut définir l'extraction des débits de vapeur, les pressions et les variations des températures, dans chaque compartiment de la turbine par un système de 1<sup>ère</sup> ordre.

Suivant le point de fonctionnement de la turbine décrit dans annexe-1-, par identification, les fonctions de transfert proposées en pression, débit de vapeur, ainsi que les températures sont données par le tableau ci-dessous.

Par supposition de la linéarité

Output	Temperature	Flow	Pressure
Extraction 1	$\frac{0.8050}{0.24s+1}$	$\frac{0.7281}{0.24s+1}$	$\frac{0.4857}{0.24s+1}$
Extraction 2	$\frac{0.6770}{0.375s+1}$	$\frac{0.1700}{0.375s+1}$	$\frac{0.2941}{0.375s+1}$
Exhaust	$\frac{0.2250}{0.4s+1}$	$\frac{0.15}{0.4s+1}$	$\frac{0.01}{0.4s+1}$

### III.6.4 Identification de la chute de pression dans une canalisation

Par variation du débit de vapeur d'extraction, les chutes de pression dans une canalisation peut être estimé via l'équation suivante:

$$P_2 - P_1 = \kappa \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \dots \dots \dots (46)$$

Avec la vitesse de la vapeur dans un conduit en fonction du débit est:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot S} \dots \dots \dots (47)$$

$\dot{m}$ : Débit ( $kg/s$ )

$S, L$ : la section  $m^2$  et la longueur du pipe

En négligeant les variations de  $\lambda$  et  $\rho$  l'équation de la chute de pression peut être écrite comme suit :

$$P_2 - P_1 = K \cdot \dot{m}^2 \dots \dots \dots (48)$$

### III.7 Bilan énergétique d'une installation d'une centrale à vapeur

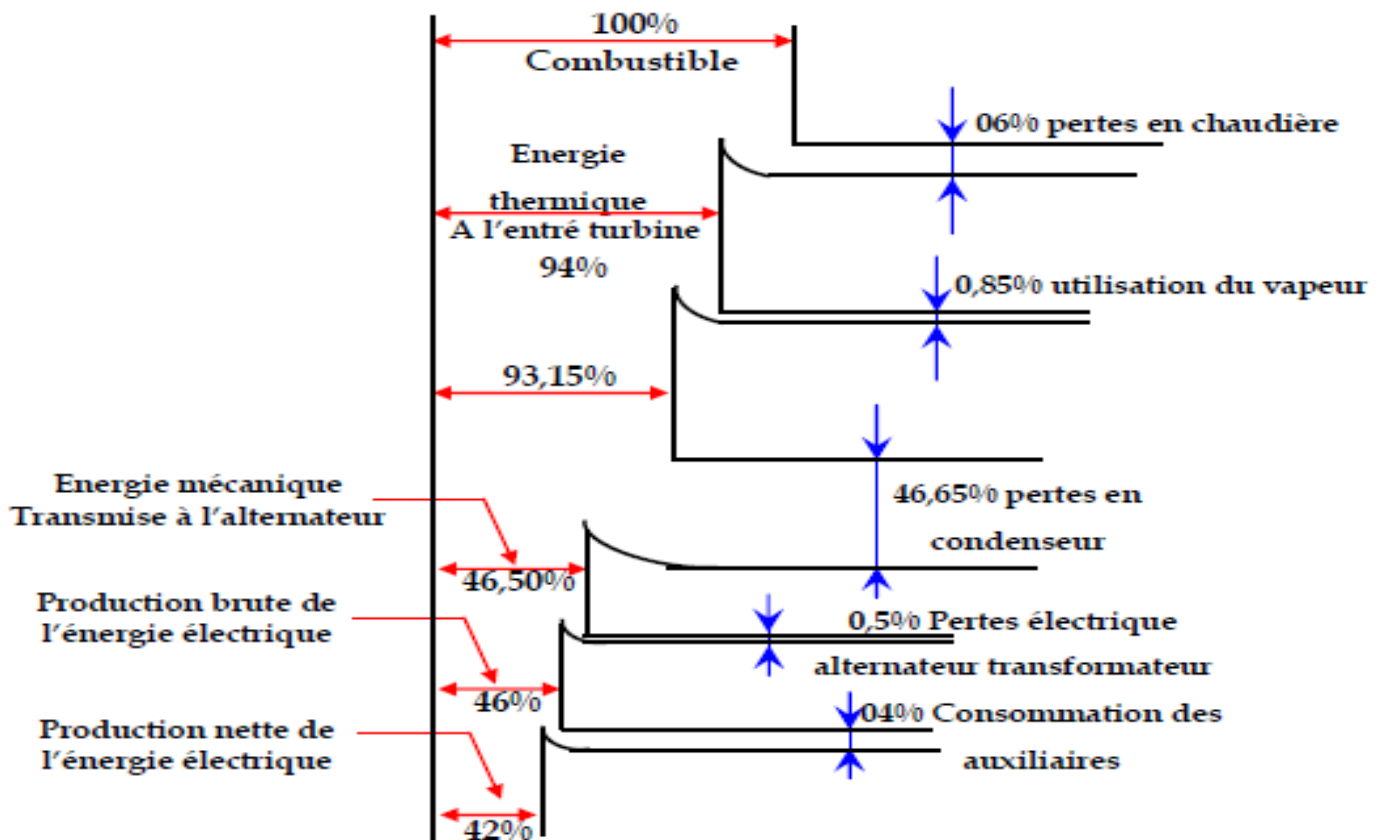


Figure III.3 : Schéma de bilan énergétique globale d'une installation simple à vapeur

### **III.8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné les modèles mathématiques de la machine synchrone et de l'ensemble turbo-alternateur par le développement des équations mathématiques afin de donner la relation entre leurs différentes caractéristiques et de faciliter l'étude des systèmes.

Dans ce qui suit, nous allons faire la simulation pour le système turbo-alternateur pour voir le comportement de ses caractéristiques vis-à-vis les charges.

# ***CHAPITRE IV***

## IV.1.Introduction

Une problématique de modélisation nécessite une réflexion préalable sur le type de phénomène à mettre en évidence ainsi que ses dynamiques. Cette réflexion essentielle détermine le niveau de complexité de la modélisation à effectuer. Le problème de niveau de tension a des dynamiques assez lentes et pourrait même être étudié grâce à des travaux en régime permanent ou statique. Cependant le régulateur à développer doit pouvoir s'adapter en fonction des évolutions du réseau [35].

Les études présentées feront l'objet d'hypothèses simplificatrices permettant une modélisation simplifiée et une rapidité de simulations accrue.

L'interface graphique de MATLAB est sans conteste l'un des points forts du logiciel et facilite le tracé de courbes et l'obtention de graphiques 2D ou 3D de grande qualité.

Le "langage" MATLAB contient un minimum de structures de programmation (structure itérative, structure conditionnelle, sous-routine) mais reste très rudimentaire.

L'avantage est qu'il est très simple et très rapide à programmer, offrant une grande tolérance (syntaxe simple, pas de définition de types,.. etc), ce qui permet un gain appréciable en temps de mise au point. L'ingénieur peut par ce moyen être plus efficace dans l'analyse d'un problème, en concentrant ses efforts sur celui-ci et non pas sur l'outil servant à le résoudre.

Les boîtes à outils (toolbox) dédiées à des domaines techniques spécifiques, sont :

- Le traitement du signal
- La régulation automatique
- L'identification
- Les réseaux de neurones
- La logique floue
- Le calcul symbolique

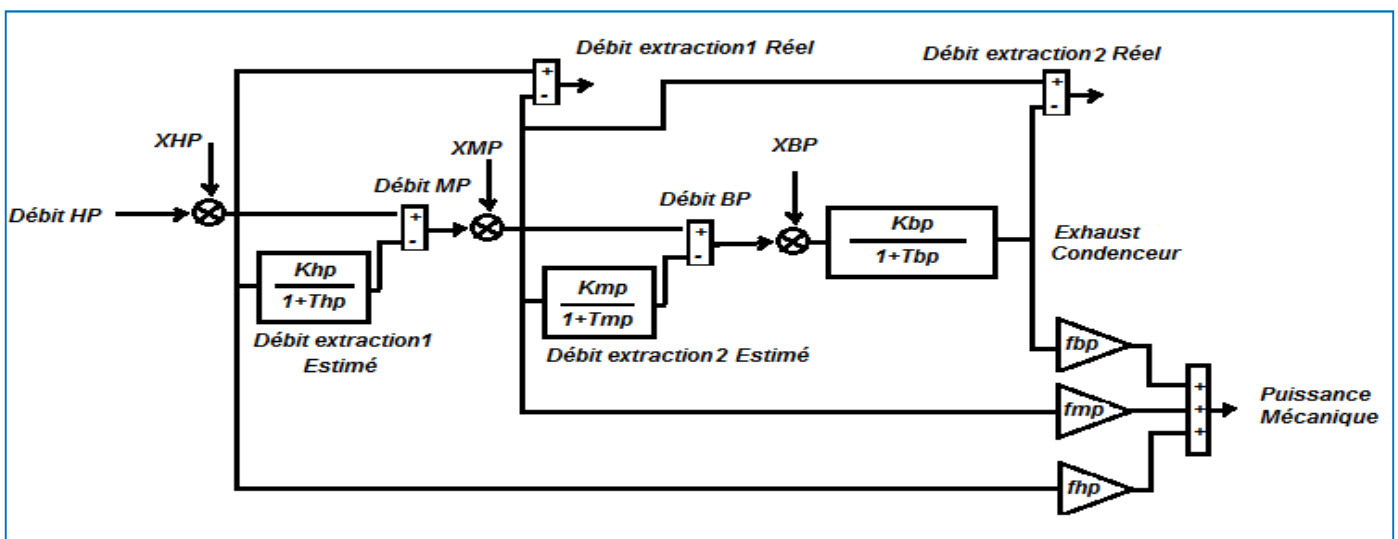
Et bien d'autres encore. Ces boîtes à outils sont simplement constituées d'un ensemble de fonctions spécialisées programmées à partir des fonctions de base de MATLAB, permettant par exemple la synthèse de filtres, le calcul de FFTs, la simulation d'algorithmes flous ou encore le calcul de réponse harmoniques. Simulink n'est rien d'autre qu'une boîte à outils de MATLAB permettant au moyen d'une interface graphique évoluée la

construction rapide et aisée ainsi que la simulation de schémas fonctionnels complexes, contenant des systèmes linéaires, non linéaires voir non-stationnaires, y compris des opérateurs logiques, des outils mathématiques d'analyse, etc.

Incontestablement, MATLAB est un formidable outil pour l'ingénieur, y compris pour celui traitant des problèmes pratiques. Avec sa boîte à outils Simulink, il est maintenant une référence au niveau mondial, non seulement dans les universités et instituts de recherche, mais aussi dans le milieu industriel [36].

## IV.2 Schéma fonctionnel de la turbine et du système de commande

Dans la majorité des modèles simplifiés des turbines à vapeur, leur schéma fonctionnel est régi par des équations différentielles (pression, débit), et chaque corps de la turbine est représenté par une fonction de transfert et des coefficients constants caractérisant les fractions de la puissance dans chaque compartiment. En s'inspirant de quelques modèles trouvés dans la littérature, la figure (IV.1), est le schéma fonctionnel d'un modèle simplifié d'une turbine à vapeur à double extraction, que nous proposons pour la modélisation et la simulation.



**Figure IV.1 :** Schéma fonctionnel d'une turbine à vapeur à double extractions.

$f_{hp}$ ,  $f_{mp}$  &  $f_{bp}$  : Les fractions des puissances des compartiments HP, MP et BP.

Donc :  $f_{HP} + f_{MP} + f_{LP} = 1$  en p.u

Suivant la représentation simulink de la figure IV.1, et les équations décrites précédemment, le schéma de simulation sous Matlab-Simulink des débits de vapeur sont donnés par les figures suivantes :

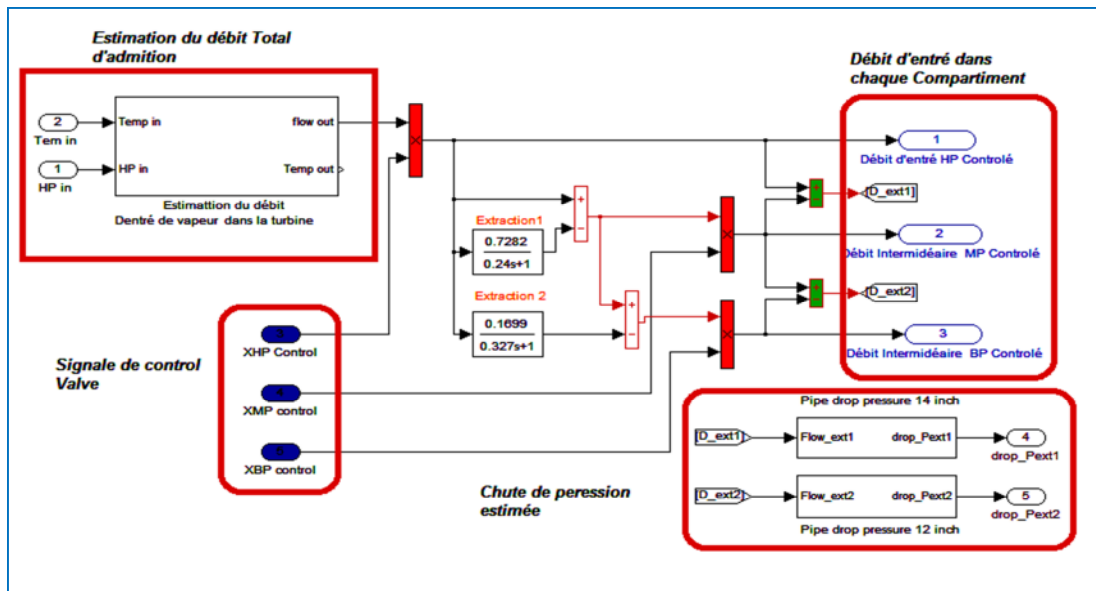


Figure IV.2 : Schéma simulink d'identification des débits de vapeur

Par arrangement de la figure VI.2, avec les fractions des puissances des compartiments HP, MP et BP, Le schéma d'identification de la puissance produite par la turbine est donné par la figure IV.3.

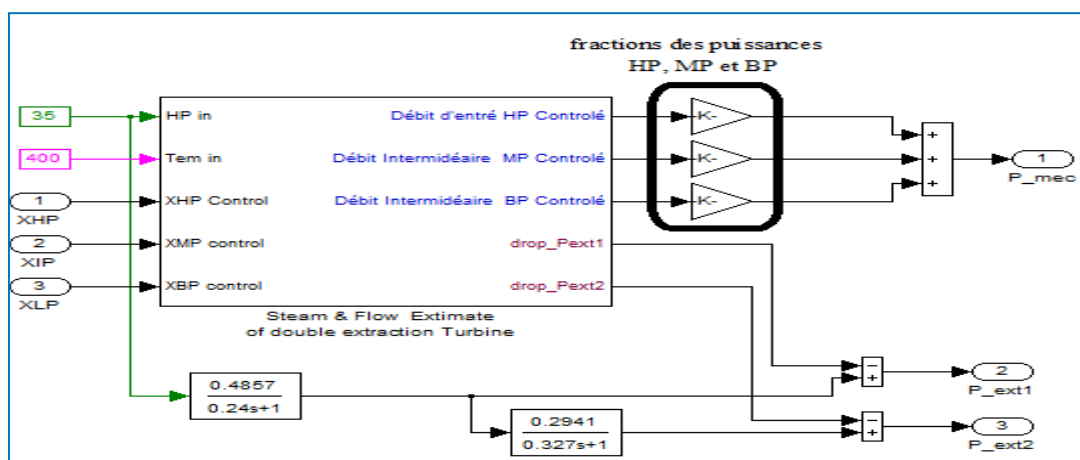


Figure IV.3 : Schéma d'identification de la puissance de la turbine sous Matlab-Simulink

Le system de régulation de cette turbine est conçu pour contrôler la vitesse et les pressions d'extractions dans chaque compartiment. Le schéma de la figure IV.4 décrit la philosophie de régulation sous Matlab-simulink.

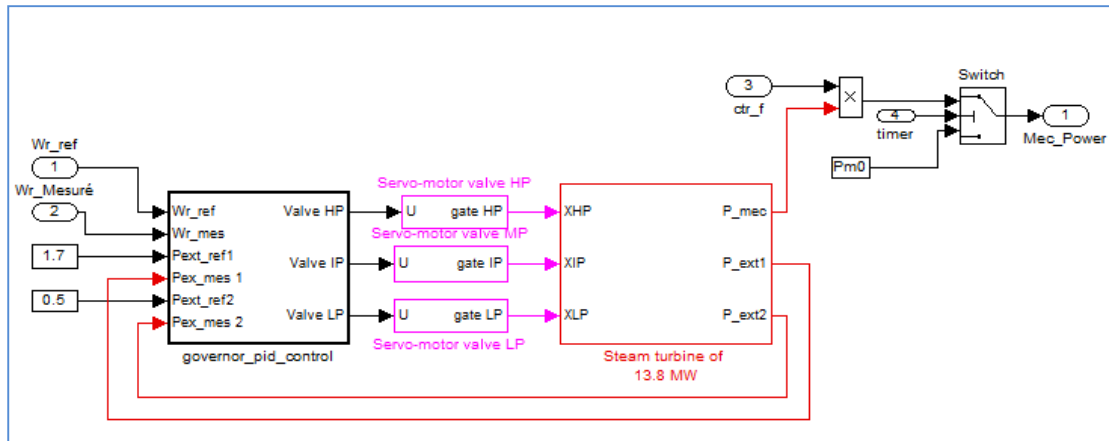


Figure IV.4: Schéma de régulation sous Matlab-simulink

### IV.3 Contrôleurs PID.

Les régulateurs PID ont un impacte signifiant sur la réponse d'un système. Ils sont souvent appelés en anglais (governor control), vue leurs sensibilités à la perturbation, ils déterminent le contrôle et ils agissent de façon rapide et efficace. [37].

Comme les vibrations affectent ces régulateurs, une dérivation avec filtre est souvent ajoutée en cascade avec la partie dérivée du régulateur [38]. Le schéma fonctionnel d'un tel PID est donné par la figure 9.

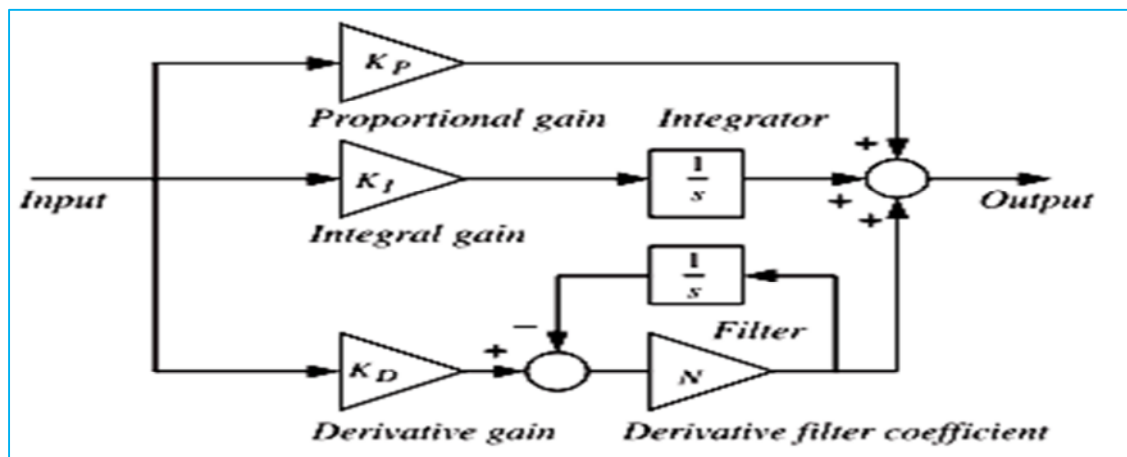
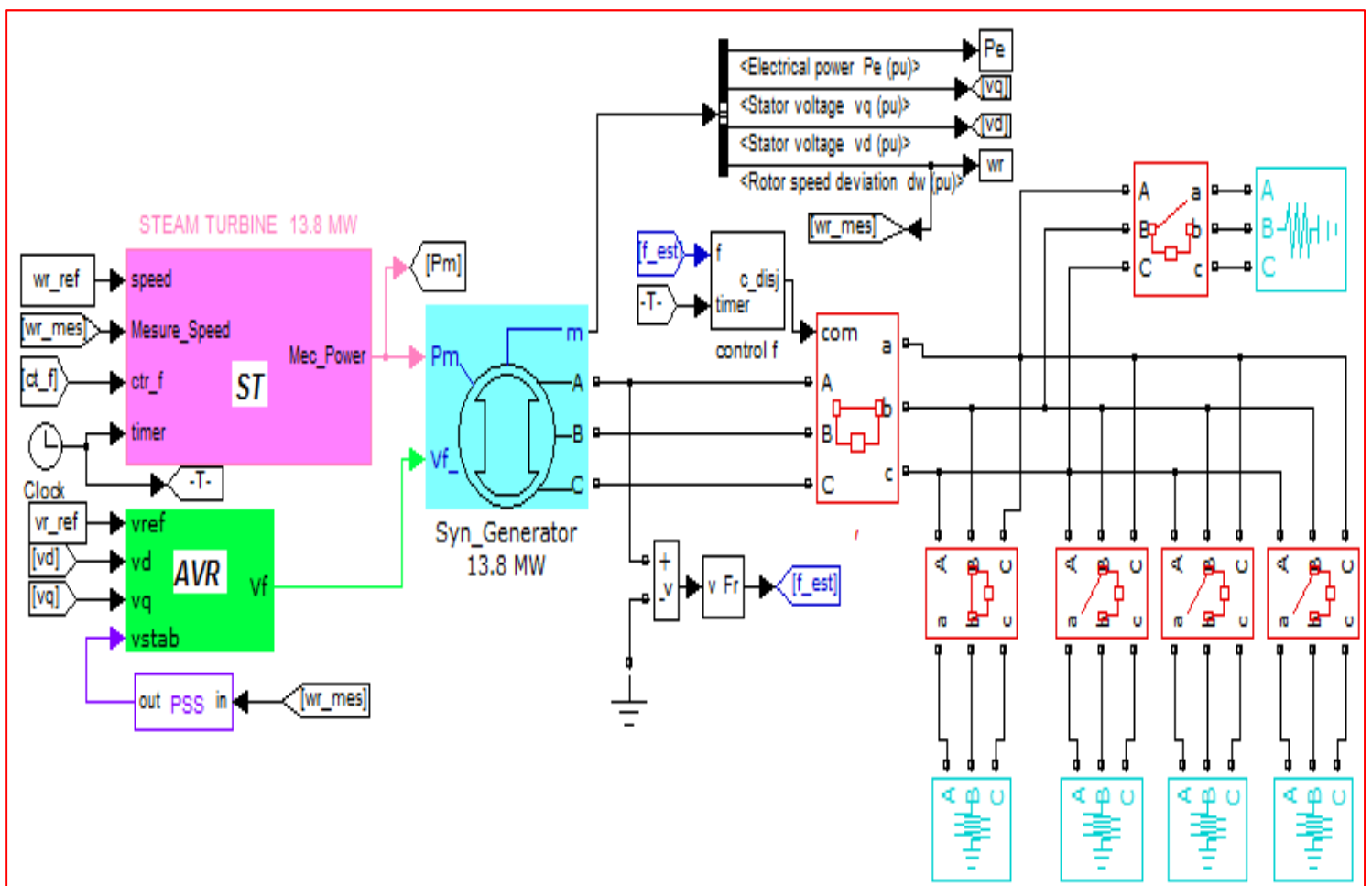


Figure IV.5 : Structure d'un contrôleur PID.

### IV.4. Model de simulation Turbine-Alternateur sous Matlab-Simulink

Pour la mise en œuvre de notre travail, nous avons fait appel aux différents modèles constitutifs d'un ensemble turbine-alternateur, dont un système (AVR) pour l'excitation, un système (PSS) pour la stabilisation et un system de régulation avec des contrôleurs PID (ZN) pour le contrôle de la vitesse et de la puissance générée par l'alternateur, ainsi que le maintien des pressions d'extractions au niveau de la turbine.

Le schéma de simulation implanté sous Matlab Simulink est donné par la figure IV.6



**Figure IV.6 :** Mode de contrôle isochrone d'un ensemble turbine-alternateur sous matlab simulink

## IV.5 Résultats de la simulation

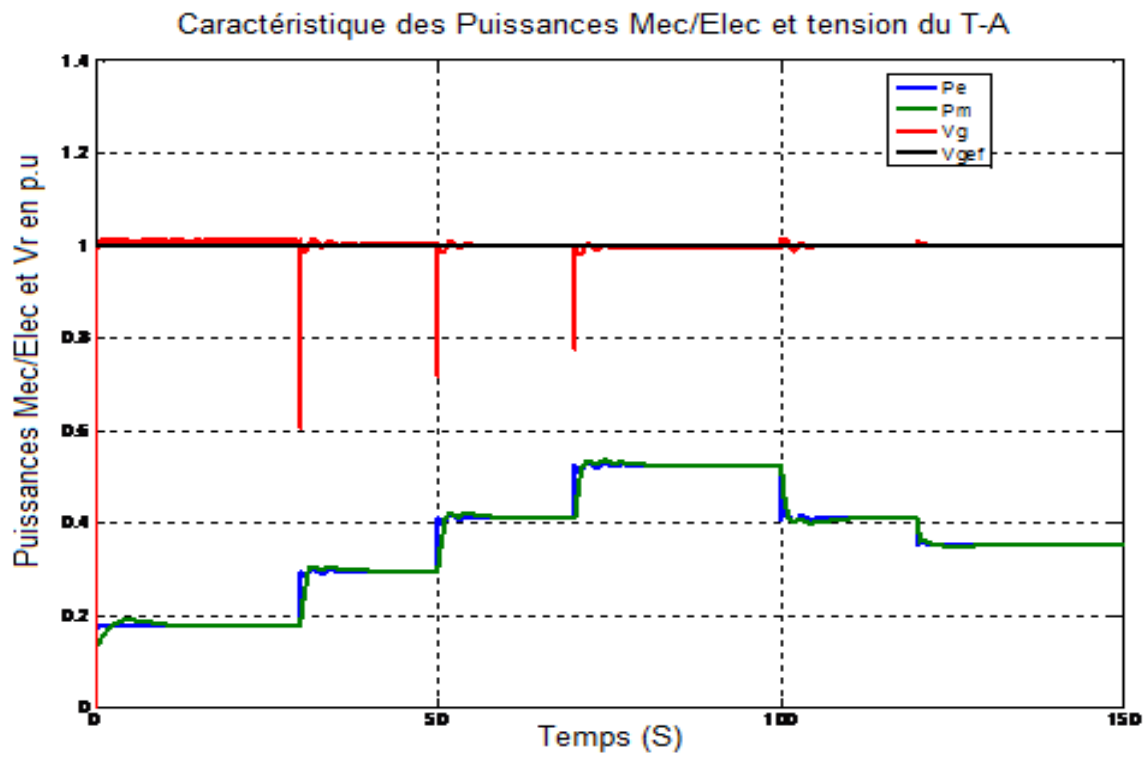
La figure (IV.6) de simulation implantée sous MATLAB-Simulink nous décrit l'ensemble du système turbo-alternateur alimentant des charges via des disjoncteurs qui peuvent être contrôlé à la fermeture ou à l'ouverture, dont le but d'ajouter ou de délester ces charges, afin d'étudier les réactions de la partie mécanique sur la partie électrique.

Ces charges sont enclenchées et déclenchées, suivant le timing inscrit dans les disjoncteurs, afin de voir l'influence de la charge sur la partie entraînement (temps de réponse et la puissance mécanique), ainsi la vitesse, la tension et la fréquence de l'alternateur. En résumé, pour étudier le comportement dynamique et statique de ce turbo-alternateur.

Les résultats de simulation sont présentés par des caractéristiques en vitesse, puissances et courant consommé par la charge.

### - **Augmentation et diminution de la charge**

Les figures (IV.7, 8, 9 et 10) présentent les caractéristiques des puissances mécanique, électromagnétique, la vitesse, les tensions et les courants de l'ensemble



**Figure IV.7 :** Caractéristique des puissances et de la tension de la turbine et du générateur en fonction de la charge

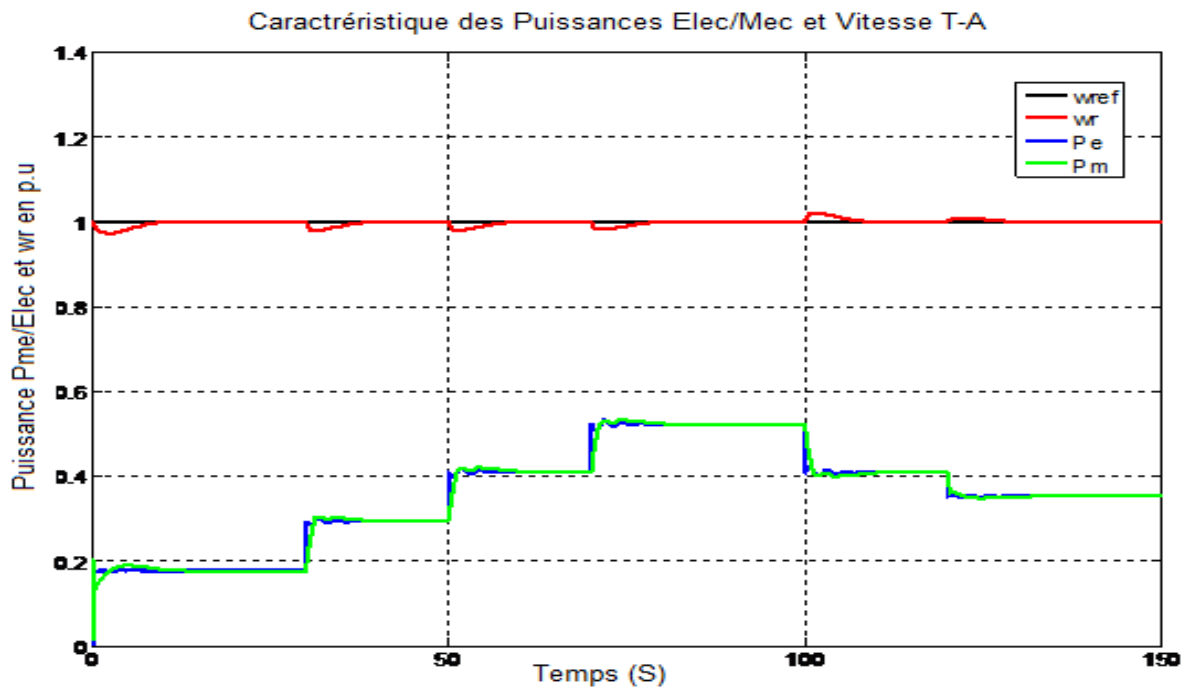


Figure IV.8 : Caractéristique des puissances et de la vitesse de la turbine à vapeur et du générateur en fonction de la charge

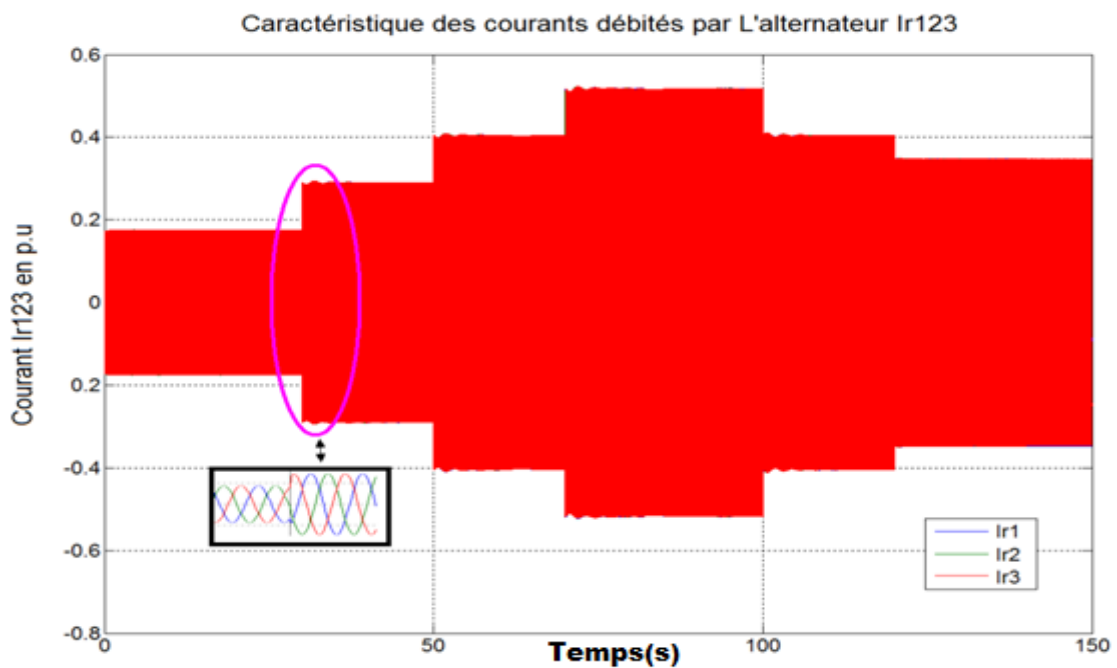
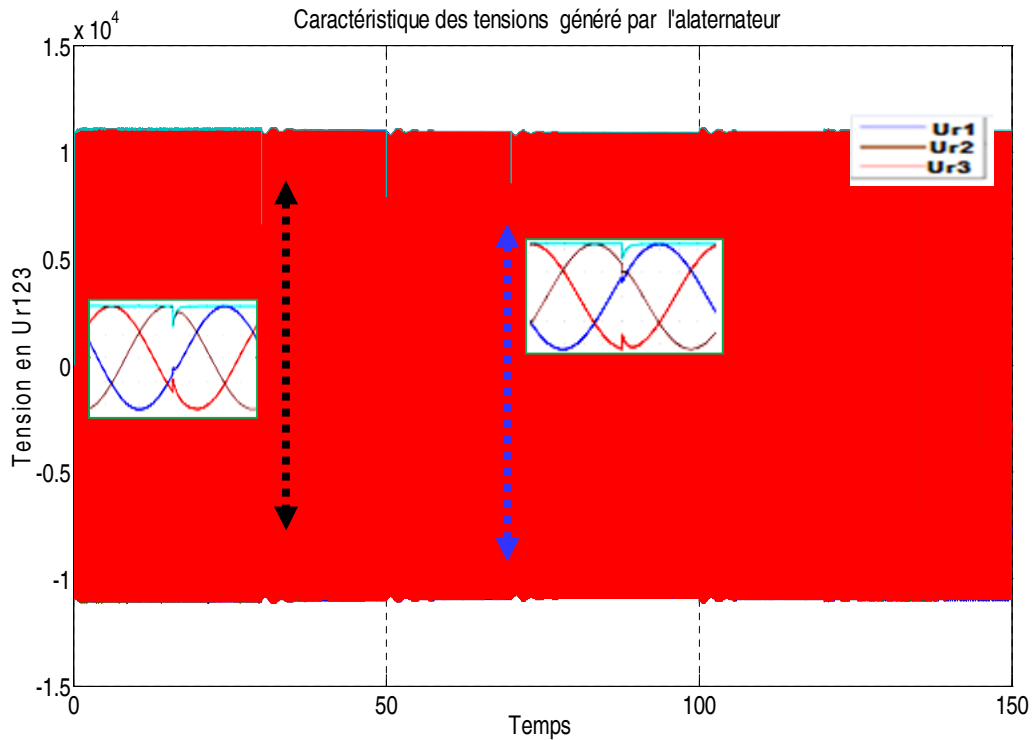
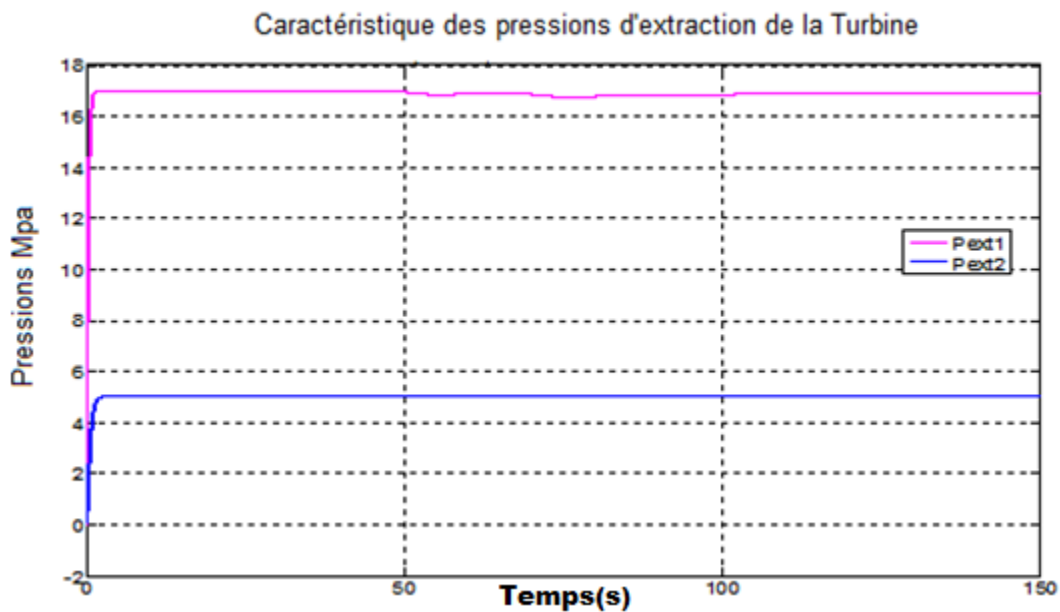


Figure IV.9 : Caractéristique des courants du générateur en fonction de la charge



**Figure IV.10 :** Caractéristique des tensions du générateur en fonction de la charge

Les réponses en pression au niveau des deux points d'extraction de la turbine à vapeur sont caractérisées par la figure IV.10 :



**Figure IV.11 :** Caractéristique des pressions d'extraction

Le travail de simulation est basé sur une méthodologie qui consiste à appliquer à l'instant ( $t_1=0$ ) deux charges ( $P_1=2$  MW,  $P_2= 3$  MW) au turbo-alternateur, après stabilisation, on ajoute successivement des charges d'ordre de (2 MW) suivant les instant ( $t_2=30$ ,  $t_3=50$  &  $t_4=70$  S) de fermeture des disjoncteurs.

Après le processus d'enclenchement, on fera la même chose mais cette fois ci en délestant les deux premières charges à l'instant ( $t_5=100$ s,  $t_6=120$ s), afin de reproduire les deux modes de fonctionnement, en visualisant l'impact de la charge sur la vitesse de rotation, les puissances, les courants, les tensions du turbo- alternateur.

D'après les résultats cités, la dynamique de réponse en vitesse-puissance de la turbine à vapeur par rapport aux variations des charges du côté générateur est acceptable, reflétant les points de fonctionnement en tension et en fréquence.

Les grandeurs de référence sont atteintes, les courants et les tensions sont sinusoïdaux.

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation d'un ensemble turbo-alternateur, constitués de plusieurs systèmes électriques tels, les disjoncteurs, AVR, PSS, les régulateurs et les charges.

Nous avons implanté ce système sous MATLAB-Simulink, ce qui nous a permet de synthétiser, et de voir le fonctionnement général lors de l'application des charges

La validation des résultats est obtenue par des réponses de courbe en puissance-vitesse, courant et en fréquence sous l'influence des charges électriques.

Nos résultats sont acceptables et similaires à ceux trouvés dans les études déjà publiés [37] [38] ce qui valide notre modèle développée dans ce mémoire.

***CONCLUSION  
GENERALE***

## **Conclusion générale**

L'évolution de la technologie exige de plus en plus la production d'énergie sous différentes formes pour satisfaire aux besoins industriels, sachant que l'énergie électrique n'est pas directement exploitable donc il est nécessaire de la produire en utilisant d'autres sources d'énergie appelées « énergies primaires » telles que l'énergie, thermique et atomique... etc.

Afin de mener à bien une étude en simulation dans le but de commander ou de surveiller le fonctionnement d'un système, l'établissement d'un modèle du système est un passage obligatoire. Dans ce mémoire, notre intérêt s'est porté sur la visualisation graphique des différents phénomènes qui peuvent être atteints lorsqu'une perturbation surgit sur le bon fonctionnement d'un système turbine-alternateur (centrale thermique à vapeur) est cela à l'aide d'un logiciel de simulation (MATLAB-simulink)

Ce mémoire concerne la contribution à l'étude d'un ensemble turbine-alternateur dont nous avons montré que dans le système de production d'énergie électrique, il est très important de maintenir la fréquence dans une plage de fonctionnement étroite en valeur et tolérance, autour d'une valeur nominale (50Hz-60Hz, +/- 5%), le respect strict de cette valeur est non seulement nécessaire au fonctionnement correct des charges mais indispensable.

Notre travail s'est articulé autour des points suivants :

- Le fonctionnement général et les constituants de la centrale thermique de production d'énergie électrique.
- Etude de groupe turbine-alternateur, dans le but d'une présentation détaillée des principaux composants afin de comprendre son principe de fonctionnement.
- la modélisation et la simulation d'un système constitué d'une turbine, d'un alternateur, des disjoncteurs, des charges avec l'ensemble des dispositifs de contrôle et de commande.

Dans la partie modélisation nous avons présenté les modèles mathématiques de la machine synchrone, fonctionnant en mode générateur, connu souvent sous le nom de l'alternateur. Cette machine synchrone est à pôles lisses, entraînée par une turbine à vapeur.

Dans la deuxième partie de la modélisation, nous avons décrit les modèles mathématiques de la turbine à vapeur, ainsi que le schéma de simulation sous MATLAB-Simulink de l'ensemble des trois corps HP, MP et BP de la turbine.

L'association, turbine-alternateur et commande, est un point important dans notre travail, auxquels on a procédé à l'assemblage de ces derniers avec d'autres équipements électriques de protection (disjoncteurs) contrôlé à l'ouverture et à la fermeture, afin d'ajouter où de délesté des charges de types (RLC). Nous avons programmé et implanté l'ensemble de ces équipements, avec les systèmes d'identification, de contrôles et de commande sous MATLAB-Simulink, sous forme de schémas bloc de simulation qui nous a permet de synthétiser, et de voir le fonctionnement générale d'un ensemble turbo-alternateur avec charge. Et pour ce faire, nous avons opté à (02) essais :

1. Par incrémentation de la charge : à l'instant ( $t_2=30$ ,  $t_3=50$  &  $t_4=70$  S) on applique successivement les charges afin de voir l'influence de la charge sur la plage de variation de la fréquence, et la dynamique de la partie mécanique.
2. Par décrémentation de la charge : à l'instant ( $t_5=100$ ,  $t_6=120$ ), on déleste successivement les charges afin de voir l'influence de la charge sur la vitesse de l'alternateur et la puissance mécanique développée par la turbine, courant et la réaction des systèmes de protection et de sécurité vis avis la perturbation.

Principalement, le système d'entraînement qui est une turbine à vapeur comme expliqué précédemment est commandé par un système de contrôle de l'ensemble turbine-alternateur (Régulateur de vitesse) connu sous le nom de (Gouverneur). Celui-ci forme une boucle de retour qui surveille la vitesse à chaque instant. En cas d'une perturbation de l'équilibre des puissances, ceci va entraîner une perturbation de la vitesse de rotation. Cette perturbation va être détecté et corriger automatiquement par le gouverneur.

Si le gouverneur n'arrive pas à corriger cet écart de vitesse, il donne l'ordre de fermeture de la vanne de sécurité. Cette survitesse est détectée par le contrôleur de fréquence relié au système de commande du disjoncteur, commèrant l'ouverture du disjoncteurs principal afin de protéger les charges alimentées.

Par concequant, le déclenchement du système de protection de la turbine va fermer la vanne principale d'admission et l'arrêt complet du système d'entraînement et d'alimentation.



# ***ANNEXES***

# Annexe :

Parametres	Operating condition Max/Nor/Min Of Speed (turbine/generator)					
	1st extraction	2st extraction	Exhaust	Inlet (max,npr & min)		
steam pressure	17 kg/cm2g Tsat (206,248)	5 kg/cm2g Tsat (158,286)	0.5 kg/cm2g Tsat (111,422)	37 kg/cm2g	35 kg/cm2g	33 kg/cm2g
steam temperture	322 deg.C	218 deg.C	49.5 deg.C	410 deg.C	400 deg.C	390 deg.C
Steam flow	0/10-150 t/h	0/10-35 t/h	31.0 t/h	11.9 to 206 t/h		

Spécification de turbine à vapeur et accessoires (complices) (SNM Réf : E10-3951-04) à 1 type de turbine à vapeur : Horizontal, l'impulsion, à plusieurs étages, la multi valve, le flux

Puissance évalué: 13.800 kW.

vitesse : 1500 tr/min. / V =400v / f=50Hz / Cos  $\Theta$  = 0.8

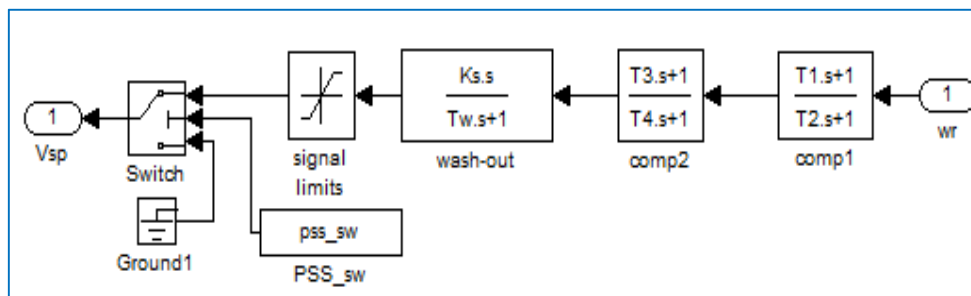


Fig.1: Single-input PSS

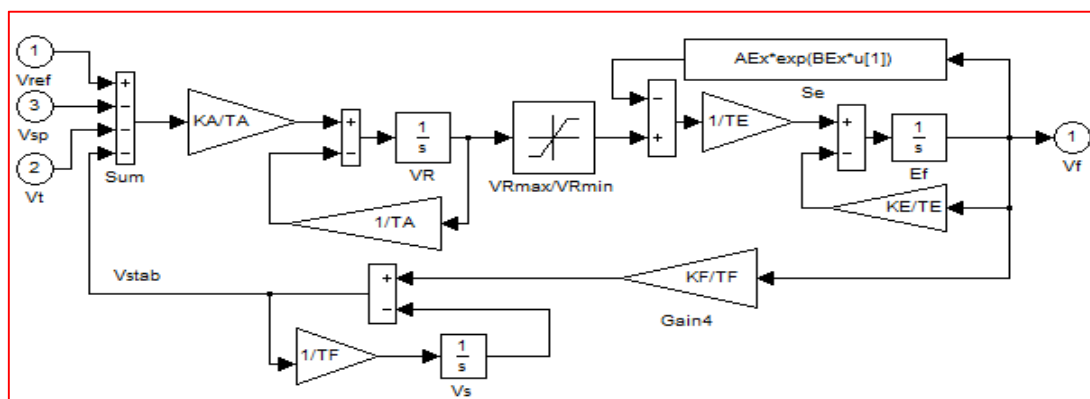


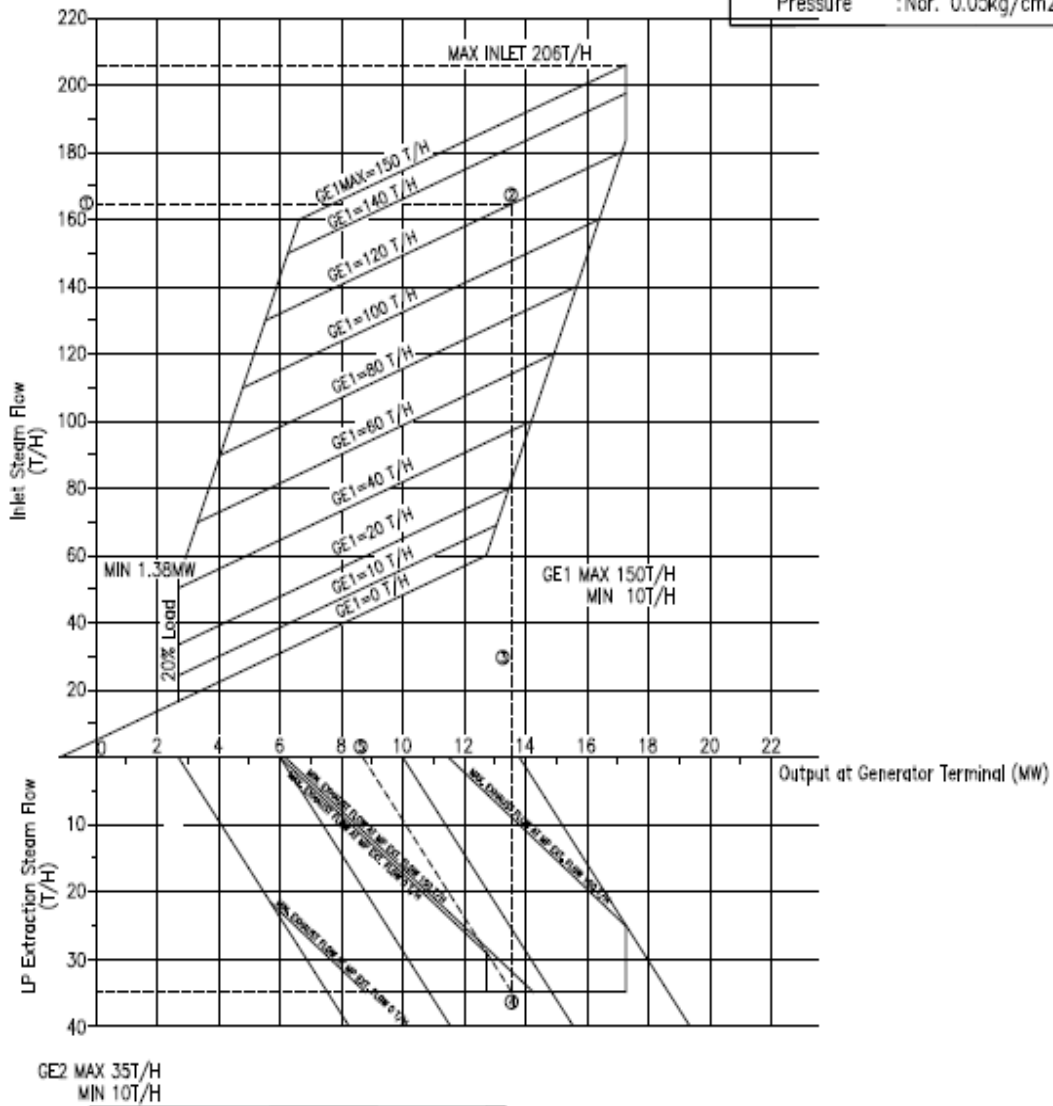
Fig.2 : IEEE Exciter with bus-fed regulator

MFG. No.	SON-7E-11605
Rated Output	13800 (kW)
Rated Speed	5014/1500 (RPM)

Driven Equipment	GENERATOR
Turbine Model No.	CB-R9-ER

Operating Steam Condition  
 Inlet Steam  
 Pressure :Nor. 35kg/cm2G  
 Temperature :Nor. 400 deg.C  
 1st. Extraction Steam  
 Pressure :Nor. 17kg/cm2G  
 2nd. Extraction Steam  
 Pressure :Nor. 5kg/cm2G  
 Exhaust Steam  
 Pressure :Nor. 0.05kg/cm2A

This curve shows Expected Performance Under Normal Steam conditions.



Operating Limit.	
Generator output	:Max. 13.8 MW
	:Min. 1.38 MW
Inlet Steam Flow	:Max. 206 T/Hr
1st. Extraction Flow	:Max. 150 T/Hr
2nd. Extraction Flow	:Max. 35 T/Hr
Exhaust Steam Flow	:Max. 31 T/Hr
	:Min. 5 T/Hr

How to read this performance curve.  
 Example. (Case A W/O MARGIN , WINTER NORMAL)  
 ① Inlet Steam Flow: 163.1 T/Hr  
 ② 1st. Extraction Flow (GE1): 120 T/Hr  
 ③ Vertical down to inter section line.  
 ④ 2nd. Extraction Flow (GE2): 35 T/Hr  
 ⑤ Up along with slanted line from inter section.  
 ⑥ Output at Generator Terminal: 8700MW

Figure 3: point de fonctionnement de la turbine à vapeur.

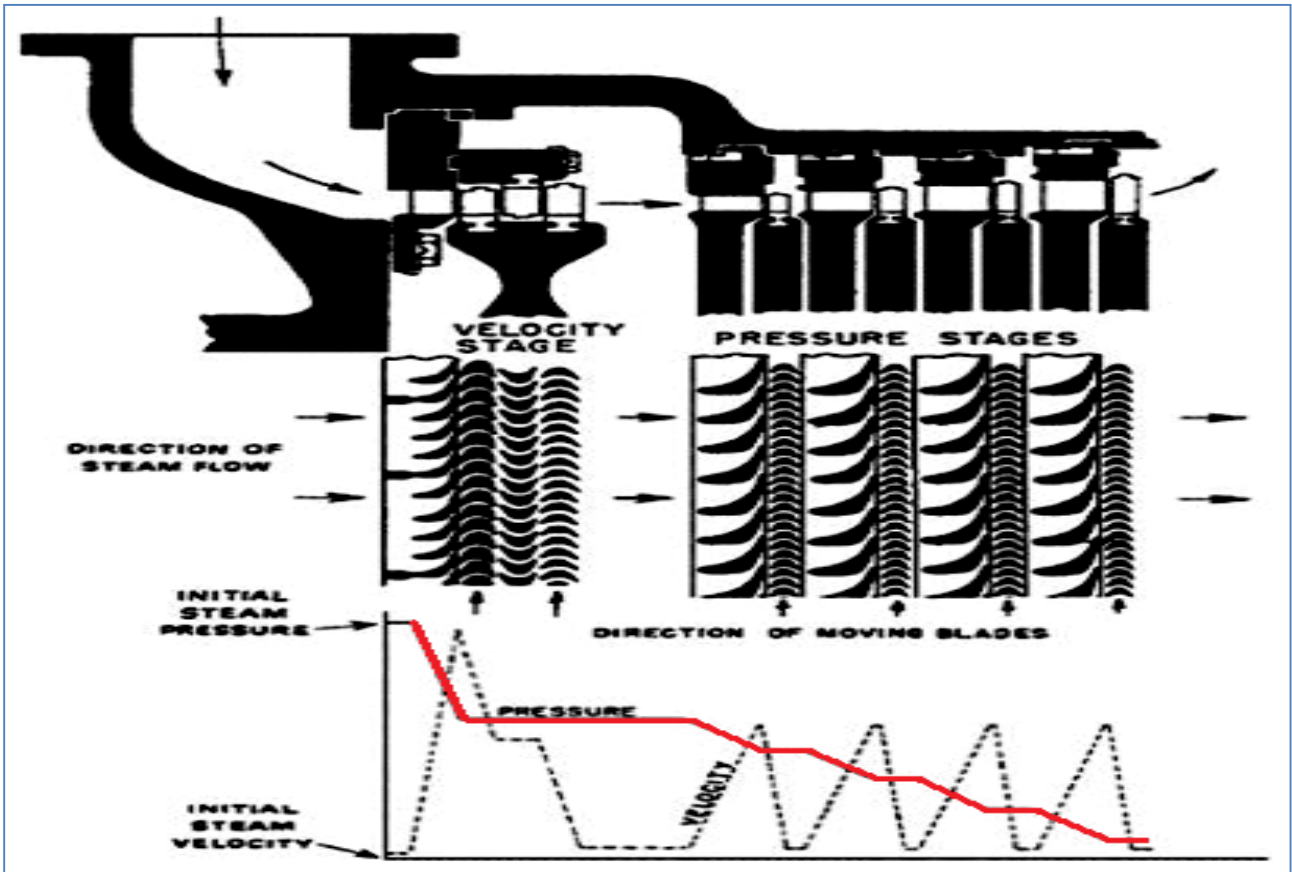


Figure-4: Les courbes de turbine à vapeur et de vitesse avec impulsion blading



# *Nomenclature de générateur de turbine à vapeur :*

C: Chaleur spécifique (kJ/kg.K)  
D: Caractéristiques d'attitude penchée (Nm/rad/s)  
h: Enthalpy spécifique (kJ/kg)  
hf: Enthalpy absolue (kJ/kmol)  
J: Moment d'inertie (kg/m<sup>2</sup>)  
K: Index d'expansion  
 $m\dot{m}$  : Débit massique (kg/s)  
D: Extraction de débit massique (kg/s)  
P: pression (MPa)  
Pe : Puissance électrique Générateur (MW)  
S: entropy (kJ/kg K)  
T: temps (s)  
Tem: temperature (C°)  
Vs: Volume spécifique (m<sup>3</sup>/kg)  
W: puissance mécanique de la turbine (MW)  
H: Constante en pu de générateur ;  $M=2*H$   
STG: Générateur de Turbine à vapeur  
Pex1: Première extraction pression  
Pex2: Deuxième extraction pression  
wr: Vitesse  
ref: Reference  
mes: Mesure  
q : Densité spécifique (kg/m<sup>3</sup>)  
S: Constante de temps (s)  
f: fréquence (Hz)  
e: électrique  
ex : extraction  
f: phase liquide  
g: phase vapeur  
In: Input  
Out: Output  
Pm: Puissance mécanique  
Pe : Puissance électrique  
V: constant volume  
HP : Haute pression  
IP : pression intermédiaire  
LP : basse pression  
 $\Delta\Omega$ : Petite vitesse d'écart(de déviation)  
P1-P2 : Pression de baisse  
t/h : Tonne par heure

Perunit = 1 paramètres rendus par unité de base de la machine (13.8 MW)

Fréquence = 50 Hz;

P = 2;

SCR=0.64;

Xo1=0.1;

Xi=0.26;

Xp=0.2;

Xo=0.1;

rs= 0.02949;

xd= 2.043;

xq= 0.960;

xls= Xo1;

xpd= 0.3386;

xppd=0.2314;

xppq=0.35;

Tpd=0.9035;

Tpdo=7.8176;

Tppd=0.02558;

Tppdo=0.03744;

Tpqo= 0.900;

Tppq=0.03837;

Tppqo=0.10635;

Ta=0.3104;

H= 1.1;

D=0;

