

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



Université Abderrahmane Mira-Bejaia

Faculté de la Technologie

Département d'Electrotechnique

MEMOIRE DE MAGISTER

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en

Electrotechnique

Option : Systèmes Electro-Energétiques

Présenté par :

CHENNA Amina

Ingénieur d'état en électromécanique

THEME

Etude et commande d'une centrale de cogénération basée sur une turbine à vapeur

Soutenu devant le jury composé de :

Rapporteurs	Mr. B. MAUCHE	MCA	Univ. de Bejaia
	Mr. D. AOUZELLAG	MCA	Univ. de Bejaia
Président	Mr. S. BERRAH	MCA	Univ. de Bejaia
Examineurs	Mr. S. HADDAD	PROF	Univ. Tizi-Ouzou
	Mr. K. GHEDAMSI	MCA	Univ. de Bejaia

2010

Remerciements

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon DIEU LE TOUT PUISSANT, qui a rendu cet ouvrage possible.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Mr. B. MAOUCHÉ et Mr. D.AOUZELLAG Maitres de conférences à l'université de Bejaia, à Mr. A. DJERRADA Docteur à l'université de Bejaia, pour leurs précieux conseils, leur encouragement et surtout leur grande disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail. Je les remercie pour la confiance dont ils m'ont témoigné.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à Mr. S.BERAH, Maitres de conférences à l'université de Bejaia pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à Mr. K. GHEDAMSI, Maitres de conférences à l'université de Bejaia, S. HADDAD professeur à l'université de Tizi-Ouzou, d'avoir bien voulu mobiliser leur temps et leurs connaissances pour jurer ce travail.

Ma très chère mère, mes sœurs (Ourida, Djidja), mon petit frère (Ibrahim), mon beau frère (Sadék), mes petits neveux (Adem, Zizou) et ma petite nièce (Aya) les mots ne suffisent pas : je vous adore, vous êtes ma vie.

Mes remerciement aussi à :

Mr A. HAMAIDI Directeur de la direction Energie Electrique, pour ces précieux conseils, et sa disponibilité.

Amis et collègues pour leurs soutient et la patience qu'ils ont montré pendant les phases difficile de ce mémoire.

Dedicaces

Je dédie ce modeste travail:

- ❖ A la mémoire de mon père, mes grands parents et mon collègue MADI Farés.
- ❖ A ma très chère mère.
- ❖ A mes deux sœurs, mon petit frère et mon beau frère.
- ❖ A ma petite nièce et mes petits neveux
- ❖ A tous mes amis.
- ❖ A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant toutes mes années d'études.

Amina
Amina

Sommaire

Nomenclature	I
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XIV
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I: GENERALITES

Introduction du chapitre	3
1. Situation énergétique mondiale	3
1.1. Préoccupations environnementales	3
1.2. Ressources fossiles	4
1.3. Défis énergétiques	4
1.4. Evolution de la production d'énergie électrique jusqu'à l'horizon 2030.....	5
2. Description de quelques moyens de production d'énergie.....	6
2.1. Energie éolienne	6
2.2. Energie hydraulique	7
2.3. Energie solaire	8
2.4. Energie thermique	8
3. Besoin du complexe agroalimentaire Cevital et son choix sur le type de la centrale de production de l'énergie	9
4. Etat de l'art et choix du système étudié.....	9
5. Centrale de cogénération	11
5.1. Ressources énergétique de la cogénération	12
5.2. Intérêt de la cogénération	12
5.3. Impact de la cogénération sur l'environnement	12
5.4. Grandes familles de cogénération	13
5.5. Contexte de production de l'énergie par une centrale de cogénération	14

5.6. Aperçu des techniques de cogénération	15
5.6.1. Technologies courantes	15
5.6.1.1. Turbine à vapeur.....	15
5.6.1.2. Turbine à gaz.....	16
5.6.1.3. Moteur à piston (à gaz et au diésel)	17
5.6.1.4. Centrales TGV.....	18
5.6.2. Technologies émergentes	19
5.6.2.1. Moteur Stirling	19
5.6.2.2. Pile à combustible	20
5.7. Critères de performance des centrales de cogénération	20
5.7.1. Cogénération à base des turbines à vapeur.....	21
5.7.2. Cogénération à base des turbines à Gaz	22
5.8. Avantages de la centrale de cogénération	23
5.8.1. Avantages économiques.....	23
5.8.2. Avantages sociaux.....	23
5.8.3. Avantages environnementaux	23
6. Générateurs électriques	24
6.1. Machine asynchrone à cage (fonctionnement à vitesse fixe).....	24
6.2. Machine asynchrone à rotor bobiné (fonctionnement à vitesse variable).....	25
6.2.1. Variation de la résistance rotorique.....	25
6.2.2. Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)	26
6.3. Machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants permanents (MSAP)	27
7. Etude énergétique de la centrale de cogénération	27
7.1. Présentation de la centrale de cogénération modélisée	27
7.2. Ressources en énergie primaire.....	28
7.3. Evaluation de l'avantage énergétique de la cogénération	28

7.3.1. Puissance introduite.....	28
7.3.2. Puissance électrique maximale d'une cogénération.....	29
7.3.3. Puissance thermique maximale utile	29
7.3.4. Rendement exergetique d'une cogénération	29
7.3.5. Economie d'énergie de la cogénération par rapport à une production séparée...	30
8. Estimation de la rentabilité du projet	32
Conclusion du chapitre.....	33

CHAPITRE II: CONTROLE DE L'ENSEMBLE CHAUDIERE- TURBINE A VAPEUR

Introduction du chapitre II.....	34
1. Chaudière	34
1.1. Description et constitution	34
1.2. Rôle de la circulation naturelle	36
1.3. Séparation eau/vapeur (ballon)	36
2. Description de la TAV	36
2.1. Eléments constitutifs des TAV.....	38
2.1.1. Vanne d'arrêt d'admission à commande hydraulique.....	39
2.1.2. Soupapes régulatrices	40
2.1.3. Principe de fonctionnement de la TAV	41
2.3. Ecoulement à travers les aubes.....	42
3. Modélisation de la chaudière.....	42
3.1. Système de régulation avec contrôleurs PI	44
3.2. Résultats de simulation avec contrôleurs PI et interprétations	46
3.3. Résultats de simulation avec contrôleurs PID et interprétations	48
4. Interaction turbine – chaudière.....	50
5. Modélisation de la turbine à vapeur	50
5.1. Modèle complet d'une turbine	50

5.2. Principe de régulation de la turbine.....	51
5.3. Description du schéma bloc	52
5.4. Servovérin	53
5.5. Mode de fonctionnement.....	53
5.6. Servovalve	54
5.7. Modèle dynamique de la servovalve (SDAP)	54
5.8. Modélisation du vérin hydraulique	55
5.9. Analyse technologique du vérin utilisé	55
6. Régulation de vitesse.....	57
7. Résultats de simulation.....	58
Conclusion du chapitre.....	62

CHAPITRE III: ETUDE DE LA CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE CONNECTEE AU
RESEAU

1. Description de la chaîne de production	63
1.1. Réseau alternatif à fréquence fixe	64
1.2. Réseau alternatif à fréquence variable	65
2. Description et modélisation du réducteur de vitesse	65
2.1 Profil apparent et profil réel	66
3. Description et modélisation de la MS3E.....	67
3.1. Description de la MS3E	67
3.1.1. Stator	68
3.1.2. Rotor.....	69
3.2. Modélisation initiale de la MS3E dans le référentiel abc.....	69
3.2.1. Equations initiales de la machine.....	69
3.3. Transformation de Park.....	71
3.3.1. Matrice de Park et relations de passage	72
3.3.2. Equations de la machine dans le repère de Park	72

4. Stratégie de commande de la MS3E	75
4.1. Principe de la commande	75
4.2. Régulation des courants	77
5. Modèle mathématique du convertisseur MLI.....	79
6. Régulation de la tension du bus continu	80
7. Modélisation du système d'excitation.....	81
7.1. Régulation du courant d'excitation	81
8. Connexion indirecte au réseau électrique	85
8.1. Commande de l'onduleur du côté réseau électrique	85
8.1.1. Régulation des courants	86
8.1.2. Calcul des courants de références	88
Conclusion du chapitre	92
Conclusion générale	93
Bibliographie.....	95

ANNEXES

Annexe A : Notion de base sur les différents éléments constituant la centrale de cogénération

Annexe B : Bilan énergétique de la centrale de cogénération

Annexe C : Principaux paramètres utilisés dans les systèmes étudiés

Les principales abréviations et notations utilisées dans ce travail sont données dans ce qui suit, au fur et à mesure de leur apparition dans le texte.

ABREVIATIONS

<u>SYMBOLE</u>	<u>DESCRIPTION</u>
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat
USGS	Service géologique du Ministère de l'intérieur des Etats-Unis d'Amérique
EDF	Electricite de France
FRS	Raffinerie de sucre
RFH	Raffinerie d'huile
TAV	Turbine à vapeur
GADA	Génératrice asynchrone à double alimentation
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
SDAP	Servovalve distributeur à action proportionnelle
EV1	Electro distributeur 1
EV2	Electro distributeur 2
SBT	Surchauffeur basse pression
SHT	Surchauffeur haute pression
ECO	Economiseur
EVA	Evaporateur
MV	Mesure de vitesse
EIA	International Energy Annuel
BP	Basse pression
MP	Moyenne pression
HP	Haute pression
MS3E	Machine synchrone à trois étages
MSI	Machine synchrone inverse
SP	Soupapes régulatrices
TGV	Turbine à gaz et à vapeur

R, RV	Régulateur et régulateur de vitesse
Ch Cond	Chaudière conditionnelle
Cogen	Cogénération
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée (insolated gate bipolar transistor)
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
PI	Proportionnel intégral
PD	Proportionnel dérivé
PID	Proportionnel-intégral -dérivé
MS	Machine synchrone
PAC	Pile à combustible

NOTATIONS

<u>SYMBOLE</u>	<u>DESCRIPTION</u>
Q_{utile}	Chaleur utile
\dot{Q}_m	Puissance thermique du cycle à vapeur
Q	Energie thermique
E	Energie électrique
$S - C$	Source chaude
$S - F$	Source froide
C_m	Couple mécanique
C_f	Travail fourni
C_r	Travail reçu
w_{spec}	Travail spécifique.
$W_{\text{is-comp}}$	Travail isentropique du compresseur.
$W_{\text{réel-comp}}$	Travail réel du compresseur
$W_{\text{is-tur}}$	Travail isentropique de la turbine à gaz.
$W_{\text{réel-tur}}$	Travail réel de la turbine à gaz
ϕ_{usine}	Rapport chaleur-force de l'usine

$\Phi_{\text{cog é n}}$	Rapport chaleur-force de la cogénération (%)
$h_1, h_2, h_3, h_{4s}, h_{2\text{-isem}}$ et h_4	Enthalpie des différents points du cycle à vapeur (kJ/kg)
W_{turbine}	Puissance de la turbine du cycle à vapeur (W)
W_{pomp}	Puissance de la pompe du cycle à vapeur (W)
\dot{m}	Débit massique (kg/s)
η_{pomp}	Rendement de la pompe du cycle à vapeur (%)
η_{therm}	Rendement thermique du cycle à vapeur (%)
η_{turbine}	Rendement de la turbine du cycle à vapeur(%)
$\eta_{\text{méca}}$	Rendement mécanique du cycle de Brayton(%)
$\eta_{\text{isen -compresseur}}$	Rendement isentropique du compresseur(%)
$\eta_{\text{isen -turbine}}$	Rendement isentropique de la turbine à gaz (%)
\dot{m}_{air}	Débit d'air
C_{pair}	Chaleur spécifique de la vapeur d'eau (kJ /kg/s)
Q_{out}	Puissance thermique à la sortie du compresseur (W)
Q_{in}	Puissance thermique à l'entrée du compresseur (W)
w_{net}	Travail net du cycle de Brayton (kJ/kg)
Q_{int}	Puissance introduite du combustible
\dot{E}_{ele}	Puissance électrique produite (W)
\dot{Q}_{the}	Puissance thermique produite
α_E	Rendement électrique de la cogénération (%)
α_{the}	Rendement thermique de la cogénération (%)
η_E	Rendement électrique de la production séparée (%)
η_{the}	Rendement thermique de la production séparée (%)
α_{tot}	Taux d'utilisation du combustible (%)
α_{ex}	Rendement exégétique (%)
EEP	Economie d'énergie primaire (%)
EEP _{relative}	Economie d'énergie primaire relative (%)
I_Q	Indice de qualité (%)

H	Enthalpie (kJ/kg)
T_0	Température initiale (°C)
Gain _{annuel net}	Gain annuel net (DA)
Gain _{éle}	Gain sur l'énergie électrique (DA)
Gain _{chal}	Gain sur l'énergie thermique (DA)
Gain _{CV}	Gain sur le certificat vert (DA)
Dépense _{comb}	Dépense sur le combustible (DA)
Dépense _{entre}	Dépense de la main d'ouvre (DA)
Investissement _{net}	Investissement net (ans)
\emptyset	Diamètre (mm)
u	Vitesse relative (m/s)
v, v ₁ , v ₂	Vitesse absolue (m/s)
z ₀	Consigne de puissance (W)
w, w ₁ , w ₂	Vitesse circumférentielle (m/s)
$\alpha, \beta, \delta, \gamma$	Angles de triangle de vitesse de la TAV (°)
S _G	Vapeur générée
S _F	Débit de vapeur dans la turbine (kg/s)
C _B	Constante de stockage
k _v , k ₁ , k ₂	Gains du positionneur
K _{SH}	Coefficient de friction de la surchauffe
$\mathcal{T}_0, \mathcal{T}_b$	Constantes de temps (°)
I _v	Cours utile du vérin (mm)
\mathcal{T}_1	Constant de temps du positionneur de la valve (s)
B	Débit de gaz de combustion (kg/s)
G, G _d	Modèle, perturbation
K	Contrôleur
G ₁₁ , G ₁₂ , G ₂₁ , G ₂₂	Eléments du modèle choisis
K, k ₁₁ , k ₁₂ , k ₂₁ , k ₂₂	Eléments du contrôleur

$m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$	Coefficients des matrices du découpleur
P_D	Pression de la chaudière (bar)
P_T	Pression de la vapeur d'eau à l'entrée de la TAV (bar)
P_N	Puissance nominale (W)
P_T	Pression de commande (bar)
$\mathcal{T}_{HP}, \mathcal{T}_{MP1}, \mathcal{T}_{BP1}, \mathcal{T}_{BP2}, \text{ et } \mathcal{T}_{BP3}$	Constantes de temps des différents étages de la TAV (s)
$P_{méc}$	Puissance mécanique
$P_{réf}$	Pression de référence bar
z	Section d'ouverture des soupapes régulatrices (m ²)
$f_{HP}, f_{MP}, f_{BP1}, f_{BP2}, f_{BP3}$	Fractions de la puissance totale générée par les sections
$d_{HP}, d_{MP}, d_{BP1}, d_{BP2}, d_{BP3}$	Débit de vapeur à la sortie des étages de la turbine (kg/s)
i	Courant électrique de commande de la servovalve
x_d	Position du tiroir de la servovalve (mm)
Q	Débit d'huile (kg/s)
ΔP	Pression d'huile de commande de la servovalve (bar)
ζ	Coefficient d'amortissement
S_v	Surface du vérin (m ²)
y	Course du vérin mm
\mathcal{T}_{cy}	Constante de temps du vérin
σ	Paramètre de statisme
k	Gain de la servovalve
$[i_m] = [i_{m1}, i_{m2}, i_{m3}]$	Courants statoriques de la MS3E
$[V]_{abc}, [V]_{dq}$	Tensions statoriques de la MS dans le repère réel et de Park respectivement
Ω	Vitesse mécanique de la machine (rad/s)
$[V_{ref}]$	Vecteur des tensions de références du côté réseau électrique
R_f	Résistance de l'enroulement d'excitation (Ω)
$[V]_{dq}$	Tensions statoriques de la MS3E dans le repère réel et de Park respectivement
u_d, i_d	Tension et courant en amont du hacheur

$P(\theta)$	Matrice de Park
$[i]_{abc}, [i]_{dq}$	Courants statoriques de la MS3E dans le repère réel et de Park respectivement
$[\Phi]_{abc}, [\Phi]_{dq}$	Flux magnétiques statoriques de la MS3E dans le repère initial et de Park respectivement
α	Rapport cyclique du hacheur
p	Nombre de paires de pôles de la MS3E
i_{r1}, i_{r2}, i_{r3}	Courants envoyés au réseau électrique
U_{dc}^*	Tension de référence du bus continu
P_{res}^*, Q_{res}^*	Puissances active et réactive de références du côté réseau électrique
P_{res}^*, Q_{res}^*	Puissances active et réactive de références du côté réseau électrique
$P_{dc}, u_{dc}, i_{dc}, C_{dc}$	Puissance, tension, courant et capacité du bus continu (en aval du hacheur) respectivement
$[V_{ref}]$	Vecteur des tensions de références du côté réseau électrique
P_{res}, Q_{res}	Puissances active et réactive du côté du réseau électrique
g	Glissement
$[R]_{abc}$	Résistance des enroulements statoriques
$[\Phi]_{abc}, [\Phi]_{dq}$	Flux magnétiques statoriques de la MS3E dans le repère initial et de Park respectivement
$[M_{sf}]$	Matrices des inductances mutuelles stator-rotor
L_d, L_q	Inductances directe et quadratique de la MS3E
θ	Position mécanique du rotor
v_{kd}	Tension amortisseur suivant l'axe quadrature
L_{a0}	Inductance propre d'une phase
M	Inductance magnétisante de la MS3E
C_m	Couple mécanique
X_{kd}	Réactance synchrone
C_{em}	Couple électromagnétique
v_f, i_f, Φ_f	Tension, courant et flux magnétique de l'enroulement d'excitation de la respectivement
I_q	Courant quadrature

Ω	Vitesse mécanique de la machine
$[i]_{abc}, [i]_{dq}$	Courants statoriques de la MS3E dans le repère réel et de Park respectivement
Δi	Bande d'hystérésis définie dans le régulateur à hystérésis
i_{ond}, I_{ond}^*	Courant d'onduleur réel et de référence respectivement
i_{r1}^*, i_{r2}^*	Courants de références du réseau électrique
$[X]$	Transposée de la matrice
v_{r1}, v_{r2}, v_{r3}	Tensions du réseau électrique
$v_{ond1}, v_{ond2}, v_{ond3}$	Tensions simples de l'onduleur (côté réseau)
P_{res}, Q_{res}	Puissances active et réactive du côté du réseau électrique
v_{r1}, v_{r2}, v_{r3}	Tensions du réseau électrique
F_1, F_2, F_3	Fonctions de connexions du convertisseur statique
v_{rd}, v_{rq}	Tensions directe et quadratique du réseau électrique
$[L_s]$	Matrice des inductances propres statoriques.
i_{ond}, I_{ond}^*	Courant d'onduleur réel et de référence respectivement
L_f, r_f	Inductance et résistance du filtre respectivement.
v_{kd}	Tension amortisseur suivent l'axe direct
$P(\theta)$	Matrice de Park
R_s	Résistance d'une phase statorique
M_0	Maximum de l'inductance mutuelle stator-rotor.
I_d^*, I_q^*	Courants de références directe et quadratique, respectivement, de la MS3E
i_{rd}^*, i_{rq}^*	Courants direct et quadratique de références du côté réseau électrique
R_f	Résistance de l'enroulement d'excitation
$[L_s]$	Matrice des inductances propres statoriques
$[M_{sf}]$	Matrices des inductances mutuelles stator-rotor
$[M_{sf}]$	Matrices des inductances mutuelles stator-rotor
p	Nombre de paires de pôles de la MS3E
θ	Position mécanique du rotor
L_d, L_q	Inductances directe et quadratique de la MS3E
ω	Pulsation des grandeurs électriques

L_{lis}	Inductance de lissage
$P_{dc}, u_{dc}, i_{dc}, C_{dc}$	Puissance, tension, courant et capacité du bus continu (en aval du hacheur) respectivement
I_d^*, I_q^*	Courants de références directe et quadratique, respectivement, de la MS3E
Δi	Bande d'hystérésis définie dans le régulateur à hystérésis.
$v_{ond1}, v_{ond2}, v_{ond3}$	Tensions simples de l'onduleur (côté réseau)
v_{rd}, v_{rq}	Tensions directe et quadratique du réseau électrique
i_{r1}, i_{r2}, i_{r3}	Courants envoyés au réseau électrique
i_{r1}^*, i_{r2}^*	Courants de références du réseau électrique
i_{rd}^*, i_{rq}^*	Courants direct et quadratique de références du côté réseau électrique
L_f, r_f	Inductance et résistance du filtre respectivement
P_a, Q	Puissances active et réactive de la MS3E
$P_{rés}$	Puissance réseau
i_{kd}	Courant amortisseur suivent l'axe direct
i_{kq}	Courant amortisseur suivent l'axe quadrature
v_f	Tension d'excitation
m_r	Module réel de la denture.
m_a	Module apparent de la denture.
P'	Pas de la denture
d	Diamètre primitif
D	Diamètre de tête
$N_{sortie}, N_{entrée}$	Produit des nombres de dents des roues menant et Produit des nombres de dents des roues menées
Z	Nombre de dents

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1: Production d'énergie électrique à l'aide des éoliennes	7
Figure I.2: Centrale hydraulique	7
Figure I.3: Capteur solaire et production d'énergie électrique à l'aide des panneaux solaire .	8
Figure I.4: Bilan de production d'énergie (thermique, électrique) de la centrale en cogénération et la consommation du Cevital Bejaia	9
Figure I.5: Cogénération à partir de biomasse	10
Figure I.6: Diagramme de flux pour une production séparée (à gauche) et pour une production en cogénération (à droite) (unité arbitraire)	10
Figure I.7: Schéma d'une centrale de cogénération à cycle combiné	11
Figure I.8: Economie d'énergie primaire avec la cogénération	13
Figure I.9: Chaîne de transformation d'énergie d'une centrale de cogénération	14
Figure I.10: Schéma de principe de la cogénération à l'aide de la TAV.	15
Figure I.11: Schéma de principe de la cogénération à l'aide de turbine à gaz	16
Figure I.12: Schéma de principe de la cogénération basée sur un moteur à piston.	17
Figure I.13: Schéma de principe de la cogénération à cycle combiné	18
Figure I.14 : Schéma de principe de la structure du moteur Stirling	19
Figure I.15: Structure de base d'une PAC. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons	20
Figure I.16: Représentation du cycle de Rankine dans le diagramme T-S de l'eau	21
Figure I.17: Cycle d'une turbine à gaz idéal-Cycle de Brayton	22
Figure I.18: Système de conversion d'énergie basé sur une génératrice asynchrone à cage (vitesse fixe)	25
Figure I.19: Système de conversion d'énergie basé sur une génératrice asynchrone à cage à fréquence variable	25
Figure I.20: Système de conversion d'énergie basé sur une génératrice asynchrone à rotor	

bobiné avec variation de la résistance	26
Figure I.21: Système de conversion d'énergie basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec réglage électronique du glissement (fonctionnement à vitesse	26
Figure I.22 : Bilan de puissance de la centrale modélisée	31
CHAPITRE II	
Figure II.1 : Chaudière à circulation naturelle	35
Figure II.2 : Rotor d'une turbine à vapeur	37
Figure II.3: Classification des TAV selon leurs utilisations.....	37
Figure II.4 : Rotor de la turbine « Thermo dyn »	38
Figure II.5 : Vue en coupe d'une turbine à vapeur (à 7 étages).....	39
Figure II.6 : Montage des soupapes à tige et avec deux ressorts concentriques	40
Figure II.7 : Géométrie des aubages, triangles des vitesses des turbines à action	41
Figure II.8 : Représentation vectorielle des vitesses par rapport aux aubes	42
Figure II.9: Schéma fonctionnel de la chaudière	43
Figure II.10: Digramme de régulation de la chaudière	44
Figure II.11 : Système de régulation avec des régulateur PI	46
Figure II.12 : Pression de la vapeur d'eau	46
Figure II.13 : Pression, section de passage et débit de la vapeur d'eau.....	47
Figure II.14: Système de régulation avec des régulateurs PID	48
Figure II.15 : Pression, débit de vapeur et la section passage	49
Figure II.16 : Régulation chaudière- turbine	50
Figure II.17 : Diagramme schématique de la turbine à cinq étages	50
Figure II.18 : Schéma bloc simplifié de la turbine à vapeur la turbine simplifié	51
Figure II.19 : Schéma principal de la régulation du servomoteur	52
Figure II.20 : Schéma de commande du servovérin	53
Figure II.21 : Schéma de principe d'un pré-actionneur hydraulique	54
Figure II.22 : Vérins linéaires (a, b)- Vérins rotatifs (c, d)	55

Figure II.23 : Vérin double effet, double tige	56
Figure II.24 : Schéma bloc du servovérin.....	56
Figure II.25 : Schéma bloc de la régulation de vitesse avec statisme.....	57
Figure II. 26 : Schéma Simplifié du bloc de régulation de vitesse avec statisme.....	58
Figure II.27 : Schéma de simulation du l'ensemble modélisé	58
Figure II. 28 : Vitesse, couple, puissance de la TAV	59
Figure II. 29 : Puissances, section de passage et débit de vapeur	60
Figure II. 30 : Puissances, section de passage et débit de vapeur	60
Figure II. 30 : Vitesse et puissance	61
Figure II. 31 : Couple, section de passage de la vapeur d'eau	61
Figure II. 32 : Puissances, section de passage et débit de vapeur	62

CHAPITRE III

Figure III.1 : Schéma du système étudié à excitation variable	63
Figure III.2 : Schéma du système étudié et de la stratégie de sa commande.....	64
Figure III.3 : Architecture de générateurs à fréquence fixe et à vitesse variable	65
Figure III.4 : Roue et engrenages droits hélicoïdaux et engrenage à denture en chevrons ..	66
Figure III.5 : Représentation des profils apparents et réels	66
Figure III.6 : Génératrice synchrone à trois étages.....	67
Figure III.7 : Génératrice synchrone à aimants permanents.....	68
Figure III.8 : Représentation symbolique de la machine synchrone	69
Figure III. 9 : Machine équivalente au sens de Park sans amortisseurs	71
Figure III.10 : Diagramme vectoriel des phases statoriques	76
Figure III.11 : Contrôle de la vitesse de la génératrice ω_G	76
Figure III.12 : Principe de la commande du redresseur (côté machine)	77
Figure III.13 : Comparaison des courants de références avec les courants réels	78
Figure III.14 : Schéma de principe du convertisseur statique	79
Figure III.15 : Bus continu avec un hacheur survolteur	80

Figure III.16: Régulation du courant envoyé au réseau	81
Figure III.17 : Schéma de régulation du courant d'excitation.....	82
Figure III.18: Débit de vapeur et couple mécanique délivré par la TAV.....	82
Figure III.19: Tension, courant, couple, puissances et facteur de puissance côté machine ..	83
Figure III.20 : Puissances, courant d'excitation et facteur de puissance côté machine	84
Figure III.21: Tension, courant, puissances et facteur de puissance côté réseau	85
Figure III.22: Commande de l'onduleur du côté réseau électrique	86
Figure III.23 : Régulation du courant envoyé au réseau	87
Figure III.24: Débit de vapeur et couple mécanique délivré par la TAV	88
Figure III.25: Tension, courant puissances et couple côté machine	89
Figure III.26 : Facteur de puissance et vitesse côté machine	90
Figure III.27: Tension et courant du bus continu	90
Figure III.28: Puissance du bus continu	91
Figure III.29 : Tension à la sortie du l'onduleur côté réseau	91
Figure III.30: Puissances du côté du réseau électrique.....	92

LISTE DES TABLEAUXCHAPITRE I

Tab. I.1 : Evaluation de la production d'énergie en Algérie.....	6
Tab. I.2 : Caractéristiques d'une turbine à vapeur.	16
Tab. I.3 : Caractéristiques d'une turbine à gaz.	17
Tab. I.4 : Caractéristiques d'un moteur à piston	18
Tab. I.5 : Caractéristiques des technologies des centrales de cogénération.	19
Tab. I.6 : Résultats de calcul des réseaux de bilan énergétique	30
Tab. I.7 : Ordre de grandeur des rendements de la cogénération	31
Tab. I.8 : Résultats de d'estimation de la rentabilité du projet étudié	32

INTRODUCTION GENERALE

Pour ses besoins et sa survie, l'homme utilise depuis longtemps les richesses de son environnement. Cependant, depuis quelques années une prise de conscience collective de la nécessité de protéger et de perdurer cet environnement est apparue. Elle s'illustre notamment par différents protocoles qui voient le jour (protocole de Kyoto) ou le durcissement des normes sur les rejets des industries et des particuliers dans l'environnement. Enfin, l'épuisement à terme des richesses naturelles fossiles (pétrole, gaz...) conduit à les économiser en améliorant des solutions existantes, mais aussi en recherchant de nouvelles solutions alternatives à la production d'énergie pour la satisfaction de nos besoins [Dav05]. Plusieurs personnes affirment que l'efficacité énergétique et les énergies propres (éolien, solaire, hydrogène, etc.) ne sont pas suffisamment rentables pour être exploitées de façon optimale.

Parmi les principaux modes de production d'énergie électrique, on trouve les centrales thermiques, destinées à convertir de l'énergie thermique en énergie électrique. Le gaz brûlé entraîne la turbine à haute vitesse accouplée à un alternateur transformant l'énergie cinétique produite en énergie électrique. Les alternateurs entraînés par des turbines à gaz, ou à vapeur sont souvent couplés par l'intermédiaire d'un réducteur mécanique afin d'adapter la vitesse de la turbine à la vitesse synchrone de l'alternateur.

La cogénération a bien des attraits autres que la simple fourniture d'électricité et de chaleur : il s'agit d'un des moyens les plus efficaces de produire de l'électricité tout en réduisant les émissions polluantes et la production de déchets. La production de l'énergie électrique n'est pas très efficace si on ne récupère pas les rejets thermiques de la centrale électrique. En récupérant ceux-ci, on augmente le rendement global de la centrale, en obtenant plus d'énergie utile par unité de combustible brûlé. On comble donc plus de besoins en rejetant moins de chaleur, moins de gaz à effet de serre et moins de polluants.

Le potentiel de la cogénération en vue d'économiser l'énergie est actuellement sous-utilisé dans la communauté. Plusieurs directives visent à faciliter l'installation et la mise en service de centrales électriques de cogénération (technique permettant de produire en un seul processus de la chaleur et d'électricité) afin d'économiser de l'énergie et de lutter contre le changement climatique.

Le présent mémoire traite une étude d'une centrale de cogénération basée sur une TAV couplée à une machine synchrone à trois étages à grande vitesse de rotation.

Ce manuscrit se compose de trois chapitres :

Dans la première partie de ce mémoire, un état de l'art des centrales de cogénérations. Quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production d'énergie (thermique, électrique) dans le monde. Plusieurs technologies des centrales de cogénérations existantes sont présentées, elles se distinguent principalement par les machines thermiques utilisées. Dans cette partie une étude énergétique de la centrale modélisée est également effectuée, qui nous a permis de situer la centrale modélisée dans le cadre de l'économie d'énergie primaire.

Le second chapitre est centré sur l'étude détaillée de l'ensemble chaudière-TAV. Le premier paragraphe est consacré à la description et la modélisation de l'ensemble, puis deux méthodes de régulation de la pression au niveau de la chaudière sont étudiées. Deux cas de fonctionnement sont considérés : fonctionnement à vitesse fixe et à vitesse de rotation variable, permettant d'étudier la réponse du régulateur de vitesse vis-à-vis des variations de la charge.

Le troisième et dernier chapitre, après avoir étudié la partie thermique et mécanique de la centrale, une étude de la production de l'énergie électrique est exposée en deux parties. La première est dédiée à l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie, basée sur une MS3E raccordée directement au réseau, la deuxième partie traite une étude de la chaîne de conversion d'énergie avec une connexion indirecte au réseau électrique. La première connexion au réseau étudiée est basée sur un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, la régulation de cette dernière est assurée par le régulateur de vitesse de la TAV, avec une excitation variable, la régulation de l'excitation est assurée par deux génératrices synchrones (MSI, MSAP) et un hacheur série. La deuxième connexion est obtenue à l'aide des convertisseurs statiques avec un fonctionnement à vitesse variable et excitation constante, la machine est considérée comme une MSAP à grand nombre de paires de pôles.

Finalement, il ne nous restera plus qu'à conclure et à proposer des perspectives d'études futures permettant de compléter ce travail.

CHAPITRE I :

GENERALITES

Introduction

Ce chapitre aborde en premier lieu le contexte énergétique actuel et la description générale des centrales de production d'énergie. Notre intérêt est porté sur la filière cogénération vu les besoins du complexe agroalimentaire Cevital de Bejaia, en énergies thermique et électriques. Les centrales de cogénérations de différentes technologies sont en permanente évolution afin d'améliorer le rendement énergétique et la qualité de l'énergie produite. A cet effet, les structures les plus couramment utilisées dans les centrales de cogénération basées sur les turbines à vapeur, turbine à gaz et moteur à piston sont abordées. En second lieu, nous présentons une étude énergétique de la centrale modélisée, à savoir, les rendements, la qualité de la centrale, ainsi que l'économie de l'énergie primaire.

1. Situation énergétique mondiale

La consommation énergétique ne peut que croître, pour deux raisons : l'une est l'accroissement accéléré de la population, qui devrait atteindre huit milliards d'individus en 2050, l'autre réside dans le fait que les pays en développement ne peuvent élever leur niveau de vie qu'en augmentant notablement leur consommation énergétique. Cela laisse supposer une demande fortement croissante en énergie électrique dans les prochaines années [Mir05, Ngo05]

1.1. Préoccupations environnementales

Le réchauffement climatique est un phénomène d'augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère, à l'échelle mondiale et sur plusieurs années. Dans son acception commune, ce terme est appliqué au changement climatique observé depuis environ vingt-cinq ans. La plupart des scientifiques attribuent à ce réchauffement global une origine en grande partie humaine. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), affirme dans son dernier et quatrième rapport en 2007, auquel ont participé plus de 2500 scientifiques de 130 pays différents [GIE07], que la probabilité que le réchauffement climatique soit d'origine humaine est de plus de 90 %. Le réchauffement climatique résulte d'une augmentation continue de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère

tels que le dioxyde de carbone et le méthane qui piègent le rayonnement infrarouge émis par la Terre. Sachant que cet effet de serre permet à l'atmosphère de se maintenir à une température moyenne de 15°C, c'est cet effet de serre additionnel induit par les activités humaines qui est responsable du réchauffement climatique. En effet, le dioxyde de carbone est produit en très grande quantité lors de la combustion des hydrocarbures qui constituent l'essentiel des carburants utilisés dans les centrales thermiques, pour les transports routiers, aériens et maritimes. En outre, la combustion des hydrocarbures dans une chaudière n'est jamais idéale. Elle est généralement accompagnée par l'émission, outre le (CO₂) et l'eau, des gaz plus ou moins toxiques tel que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx) et les hydrocarbures non brûlés (HC). Ces gaz ont un effet nuisible direct sur l'environnement et la santé humaine, contribuant à la formation de smog (mélange de brouillard et de fumée), des pluies acides [Fer01], et d'ozone ou à un empoisonnement direct dans le cas du monoxyde de carbone [CSH05]

1.2. Ressources fossiles

Le pétrole forme la majorité des combustibles utilisés dans le transport. Il constitue avec les autres ressources fossiles (gaz naturel et charbon) 86% de la production d'énergie primaire mondiale (base 2005) selon l'EIA [EIA07], l'énergie hydroélectrique ne constituant que 6,3 %, le nucléaire 6% et les autres énergies renouvelables (géothermique, solaire, éolienne, biomasse) 0,9%. D'autre part, les réserves de combustibles fossiles de la planète sont fixes et, au rythme actuel de la consommation, leur épuisement doit être envisagé. Fixer une date pour l'épuisement du pétrole reste controversé et dépend de la découverte de nouvelles réserves ou ce qu'on appelle les réserves non prouvées par opposition aux réserves prouvées qui par définition, selon les informations géologiques et techniques disponibles, ont une forte probabilité d'être récupérées dans le futur, à partir de gisements connus et dans les conditions technico-économiques existantes. Cependant, certaines estimations, comme l'USGS, prédisent que les réserves de pétrole deviendront économiquement inexploitable dans les années 2050. [Wal08]

1.3. Défis énergétiques

Considérant cet épuisement inéluctable des réserves d'énergie fossile ainsi que les préoccupations environnementales déjà évoquées, l'humanité va donc être confrontée, d'ici le milieu de ce siècle, à un gigantesque défi technique, économique et social : remplacer les énergies fossiles par des sources et des formes d'énergie renouvelables, économiquement

viables et socialement acceptées. Si aucune des énergies renouvelables existantes n'est capable à elle seule de combler le vide causé par l'épuisement des réserves fossiles, c'est l'ensemble de ces sources d'énergie combinées avec une utilisation plus répandue mais contrôlée du nucléaire qui pourront assurer le besoin en énergie surtout électrique. En perspective, la fusion nucléaire contrôlée et l'énergie solaire spatiale fourniront, une fois les défis technologiques relevés, l'énergie pour plusieurs décennies.

1.4. Evolution de la production d'énergie électrique jusqu'à l'horizon 2030

Au cours de la période de 30 années considérée, le développement et la mise en œuvre des options technique fondées sur les trois familles de sources d'énergie que sont les combustibles fossiles, l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables, seront essentiellement influencés par trois forces directes : les enjeux environnementaux, les préoccupations relatives à la sécurité des approvisionnements , et , surtout, la compétitivité économique dans un marché de plus en plus ouvert à la concurrence. [Gér02]

Le tableau I.1 présente l'évolution des énergies renouvelables et de cogénération en Algérie. On constate bien que l'énergie électrique est en évolution d'une année à une autre. Une contribution des énergies renouvelables et de la cogénération de 3,7 tWh, soit 6 % de la production totale est prévue à l'horizon 2015.

En France par exemple la cogénération a connu trois grandes périodes [Nas09]:

- ♣ Entre 1991 et 1997, grâce aux contrats d'achat et aux garanties apportées par EDF, 189 installations ont été créées, pour un total de production de 820 MW.
- ♣ Après cette activité, le développement s'est intensifié, avec 3600 MW supplémentaires, portant le nombre d'installations à 480 ; le principe était de rémunérer l'opérateur sur la base des coûts évités par EDF et d'ajouter à ce prix une garantie calculée sur les prix du gaz plafonnés.
- ♣ A partir de 2000, cependant, la dynamique a été brutalement freinée, avec seulement 580 MW supplémentaires installés.

Aujourd'hui, la puissance totale s'élève donc à 5 GW , le tiers de l'approvisionnement énergétique des réseaux de chaleur provenant de la cogénération.

Tab. I.1 : Evaluation de la production d'énergie en Algérie. [Moh07]

Année		2 006	2 008	2 010	2 012	2 014	2 015
Solaire thermique	MW	0	30	100	100	170	170
	GWh	0	60	200	200	340	340
	% bilan production	0,000	0,149	0,442	0,384	0,572	0,532
Eolienne	MW	0	20	20	80	80	100
	GWh	0	40	40	160	160	200
	% bilan production	0,000	0,099	0,176	0,307	0,268	0,312
Co-génération	MW	0	100	200	300	400	450
	GWh	0	700	1400	2100	2800	3150
	% bilan production	0,000	1,767	3,178	4,183	4,911	5,156
Photo-voltaïque	MW	0,3	1,6	2,6	3,6	4,6	5,1
	GWh	0,6	3,2	5,2	7,2	9,2	10,2
	% bilan production	0,000	0,149	0,442	0,384	0,572	0,532
Total	MW	0,3	151,6	342,6	483,6	654,6	725,1
	GWh	0,6	803,2	1685,2	2467,2	3309,2	3700,2
	% bilan production	0,002	2,023	3,808	4,888	5,766	6,016

2. Description de quelques moyens de production d'énergie

Une centrale de production d'énergie est un site industriel destiné à la production d'énergie (électricité, chaleur ...etc.). Elles transforment différentes sources d'énergie naturelle en énergie intermédiaire, puis utile, afin d'alimenter les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. Les réseaux de distribution d'énergie permettent de transporter puis de distribuer l'énergie jusqu'aux consommateurs. On distingue plusieurs moyens de production d'énergie (renouvelables ou non renouvelables) : centrales thermiques, hydrauliques, solaire photovoltaïque et thermique, éolien ...etc.

2.1. Energie éolienne

L'énergie éolienne qui doit son nom au dieu grecque responsable des vents nommé Eole, est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au cube, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. C'est l'une des formes d'énergie les plus anciennes utilisée pour suppléer à la force humaine (figure I.1).



Figure I.1 : Production d'énergie électrique à l'aide des éoliennes [Ber09]

2.2. Energie hydraulique

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et « stockable ». Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique [Eur00]. Certains pays (dont la France) sont déjà « saturés » en sites hydroélectriques exploitables et ne peuvent pratiquement plus progresser dans ce domaine. Les sites de petite puissance (inférieures à 10kW) sont des solutions très prisées dans les applications aux petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont un grand avantage. [Ada05]

En Europe, en 1999, on comptait environ 10000 MW de puissance hydraulique installée. A l'horizon 2100, cette puissance devrait passer à plus de 13000 MW. [Ada05]

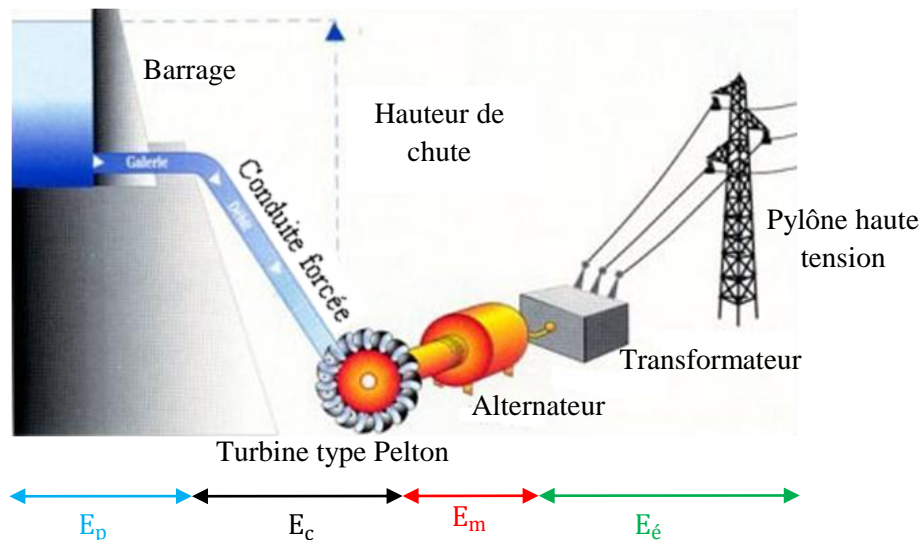


Figure 1.2 : Centrale hydraulique

2.3. Energie solaire

L'énergie solaire est le rayonnement électromagnétique (comprenant les lumières infrarouge, visible et ultraviolette) libéré par les réactions thermonucléaires dans le noyau du soleil. L'énergie solaire est la source de toute forme d'énergie consommée par les humains. Les formes d'énergie indirectes comprennent l'hydroélectricité, l'énergie thermique des océans, l'énergie marémotrice et l'énergie éolienne. Le soleil alimente aussi le procédé de la photosynthèse, la source initiale de l'énergie contenue dans la biomasse, la tourbe, le charbon et le pétrole. Cependant, on réserve habituellement l'expression « énergie solaire » à la partie de l'énergie rayonnée par le soleil et utilisée dans un but particulier grâce à des dispositifs créés par l'homme (figure I.3).

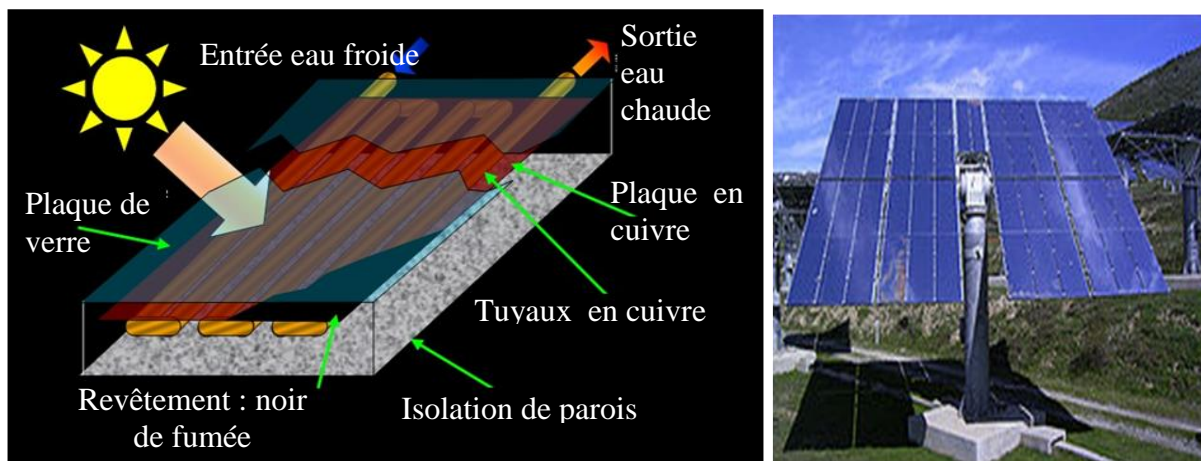


Figure 1.3 : Capteur solaire et production d'énergie électrique à l'aide des panneaux solaire [And09]

2.4. Energie thermique

Les centrales thermiques utilisent l'énergie calorifique des combustibles fossiles ou de l'uranium pour produire de la vapeur d'eau, celle-ci actionne une turbine à vapeur reliée à une génératrice. En plus des combustibles nécessaires, une centrale thermique doit disposer d'une source d'alimentation en eau pour refroidir et condenser la vapeur d'échappement de la turbine afin qu'elle puisse servir de nouveau dans le cycle de génération de vapeur.

Les produits nucléaires utilisés dans les centrale nucléaires sont des substances naturelles ou artificielles émettant, par suite de désintégration des noyaux de leurs atomes, des rayonnements sous forme de particules ou de rayonnements électromagnétiques (identiques aux rayons lumineux, radio ou aux rayons X) appelés rayonnements ionisants. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs dont la gestion pose d'importants problèmes.

3. Besoin du complexe agroalimentaire Cevital et son choix sur le type de la centrale de production de l'énergie

Le complexe Cevital a opté pour la dernière famille c'est-à-dire une centrale thermique en cogénération vu ces besoins en énergie électrique et thermique. Les deux diagrammes de la figure (I.4), illustrent les pourcentages des besoins en énergie électrique et thermique et la production de la centrale en cogénération.

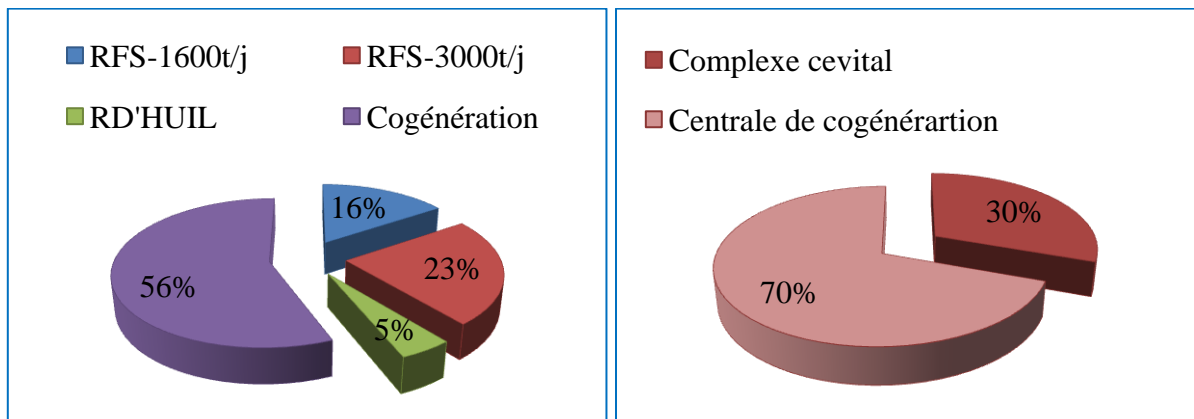


Figure 1.4 : Bilan de production d'énergie (thermique, électrique) de la centrale en cogénération et la consommation du Cevital Bejaia.

On constate que la :

- ♣ production de vapeur de la cogénération est deux fois supérieure à celle consommée par le complexe Cevital, cet excès de vapeur est envisagé dans le but d'augmenter la capacité des différentes unités de production (FRS3000T/h, RFS 1600T/H, et la RFH) ;
- ♣ consommation de l'énergie électrique du complexe Cevital est de 30% par rapport à celle produite par la centrale de cogénération d'où l'avantage de vendre l'excès de l'énergie électrique à SONELGAZ.

4. Etat de l'art et choix du système étudié

Selon les lois de la thermodynamique, la conversion de chaleur en travail (puis en électricité) ne peut être totale. Si elle n'est pas valorisée, la chaleur qui n'est pas convertie, est simplement dissipée dans l'environnement (par exemple, dans la tour de réfrigération d'une centrale thermique). Cette dissipation constitue une perte énergétique nette pénalisant fortement l'efficacité globale de la conversion. La valorisation de cette chaleur permet d'accroître la part d'énergie primaire valorisée et ainsi de réduire la consommation d'énergie primaire à énergie finale constante : c'est ce qu'on appelle une centrale de cogénération (figure I.5).

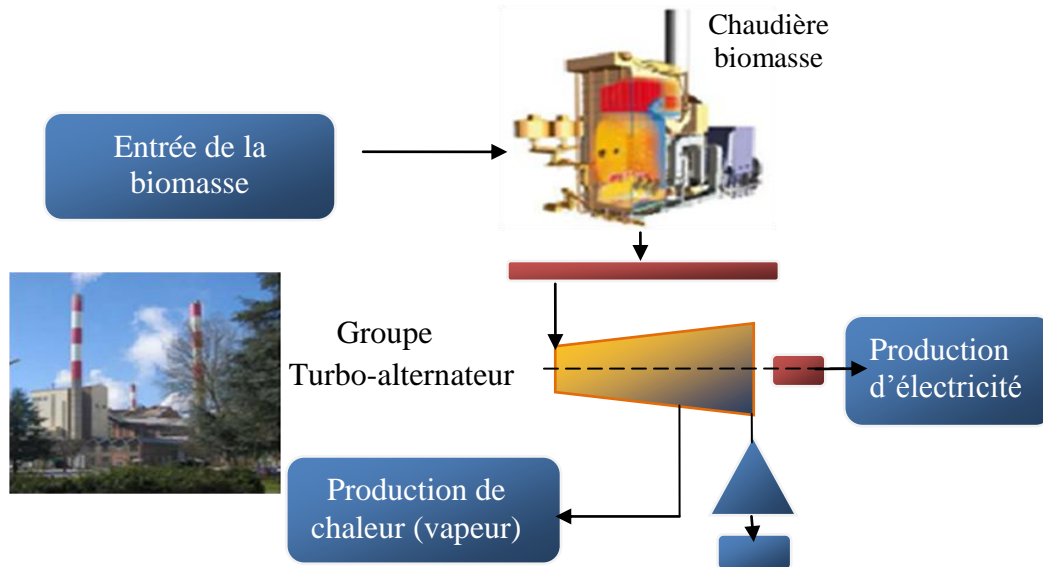


Figure 1.5 : Cogénération à partir de biomasse

Un système de cogénération permet de convertir une unique ressource énergétique sous deux formes d'énergie secondaires utilisables : une forme d'énergie à haut contenu exégétique (mécanique ou électrique) et une énergie thermique. Sur un exemple de production combinée électrique et thermique (Figure 1.6), pour une même production d'énergie finale électrique (35%) et thermique (60%), la part d'énergie valorisée passe de 53 % (production séparée) à 95 % (cogénération). Ainsi, à service énergétique constant, la cogénération diminue la consommation d'énergie primaire (de 38,6 % dans notre exemple), et par conséquent réduit les impacts environnementaux liés à cette consommation (figure I.6). [Thi08]

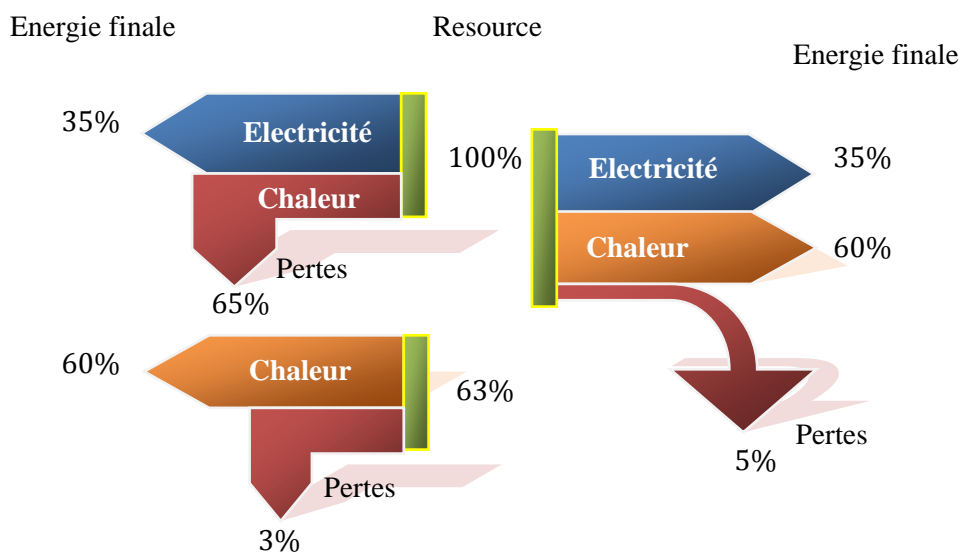


Figure 1.6 : Diagramme de flux pour une production séparée (à gauche) et pour une production en cogénération (à droite) (unité arbitraire)

La cogénération est un procédé aujourd'hui largement répandu. En 1999, l'électricité produite par cogénération représentait 10 % de l'électricité dans le monde et jusqu'à 50 % au Danemark, pays où cette technologie est la plus développée, mais seulement 3 % en France [EDU01]. Selon leur dimensionnement, les systèmes de cogénération peuvent être employés pour des procédés industriels, des réseaux de chaleurs, des bâtiments tertiaires ou résidentiels. De plus, les usages d'un système de cogénération peuvent être étendus à la production de froid par le couplage de machines à absorption (trigénération).

5. Centrale de cogénération

On appelle cogénération la technique de production énergétique qui réalise la conversion simultanée en deux formes d'énergies utiles : la chaleur Q_{utile} et le travail C_m à partir de l'énergie primaire du combustible. En réunissant dans une seule installation la production d'énergie électrique et la production de chaleur, la cogénération exploite au maximum l'énergie primaire des combustibles, la fraction d'énergie à la température la plus haute est convertie en énergie électrique et la fraction à la température la plus basse, au lieu d'être dissipée dans l'environnement, est rendue disponible pour des applications thermiques appropriées. La réduction de l'impact environnemental est due à la fois à la diminution des émissions de gaz à effet de serre et à la diminution de la pollution thermique. L'énergie thermique est récupérée sur les gaz d'échappement et les circuits de refroidissement des moteurs, des turbines à gaz, ou sur la vapeur détendue dans les turbines à vapeur ; elle est revalorisée dans des réseaux de chaleur ou des procédés industriels (figure I.7)

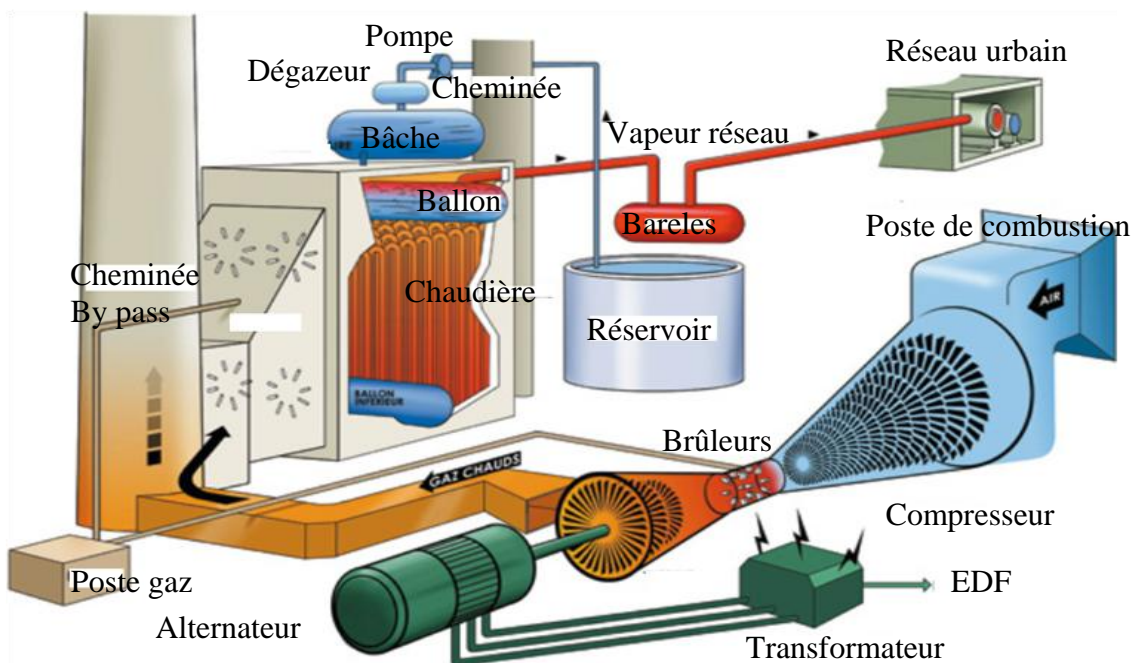


Figure 1.7 : Schéma d'une centrale de cogénération à cycle combiné

Les équipements de production d'énergie sont habituellement activés par la combustion de pétrole, de gaz naturel ou de biomasse. Une partie de la chaleur de combustion qui n'a pu être convertie en électricité peut être récupérée pour répondre aux besoins de charges thermiques locales : chauffage de bâtiments ou utilisation dans les procédés industriels.

5.1. Ressources énergétique de la cogénération

Les ressources de la cogénération sont des sources non renouvelables, contrairement aux énergies solaire, hydroélectrique, géothermique, éolienne...etc. Les énergies fossiles résultent d'une accumulation d'énergie solaire captée par des êtres vivants pendant des millions d'années. Elles regroupent trois sources d'énergie que l'on connaît bien : [Dav01]

- ♣ charbon ;
- ♣ gaz naturel ;
- ♣ pétrole.

5.2. Intérêt de la cogénération

Le principal intérêt d'une centrale à cogénération est de pouvoir la localiser proche d'une charge thermique qui pourra bénéficier de ces rejets de chaleur. Au lieu de n'utiliser que de 25 à 55% du contenu énergétique du combustible, on bénéficiera de 60 à 90 % de cette énergie primaire, selon les équipements et les applications. Les rejets thermiques peuvent servir à des procédés industriels, au chauffage des locaux, à la production d'eau chaude, de froid et à bien d'autres usages. [Ism00]

D'un point de vue financier, l'élément le plus souvent déterminant est la valeur de l'électricité produite. Cette forme d'énergie est celle qui a le plus de valeur car l'électricité se transporte plus facilement que la chaleur et permet de répondre à un plus grand nombre de besoins énergétiques. Cependant, lorsqu'on a besoin de construire une centrale pour combler un besoin thermique particulier, il peut valoir la peine d'investir un peu plus pour bénéficier en plus de la production d'électricité. [Joë08]

5.3. Impact de la cogénération sur l'environnement

L'émission de polluants chimiques et de gaz à effet de serre constitue le désavantage majeur des centrales thermiques. Par contre, le développement de moyens efficaces pour limiter ces émissions se poursuit afin de permettre au secteur de l'énergie thermique de continuer à contribuer à la croissance économique, notamment là où les autres sources d'énergie sont restreintes. [Geo07]

La figure (I.8) illustre l'intérêt de la cogénération sur l'économie de l'énergie primaire, une réduction de 25%, ce qui revient en une réduction des émissions à effet de serre, et moins de pollution.

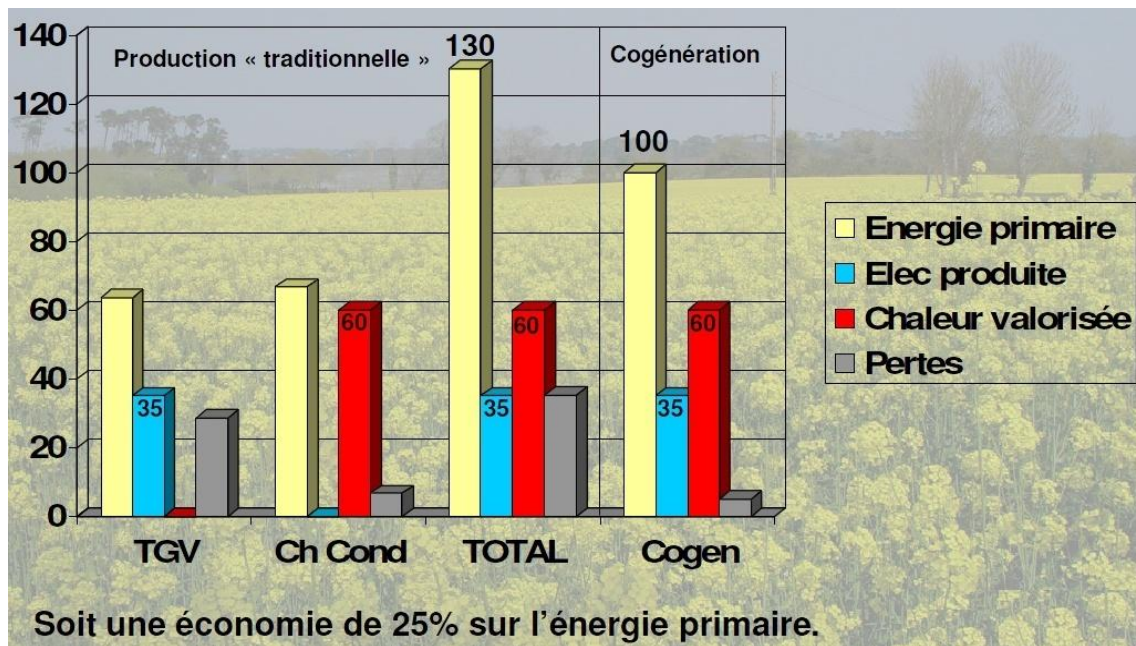


Figure 1.8 : Economie d'énergie primaire avec la cogénération [Jea08]

5.4. Grandes familles de cogénération

La cogénération rassemble trois grandes familles qui se distinguent essentiellement en fonction de leurs puissances :

- ♣ La cogénération: elle fonctionne sur de fortes puissances (au-delà de 500 kW à 600 MW) ;
- ♣ La mini-cogénération : les puissances sont comprise entre 36 et 250 kW ;
- ♣ La micro-cogénération: 0,01 kW à 36 kW. [Las06]

On peut regrouper les installations de cogénération en trois classes, selon que le rapport chaleur – force de l'usine soit ou non couvert par celui de l'installation de cogénération : [Sté08]

$$\varphi_{\text{usine}} = \varphi_{\text{cogéné}} \text{ avec } \varphi_{\text{usine}} \Leftrightarrow \varphi_{\text{cogéné}} \quad (\text{I.1})$$

- ♣ $\varphi_{\text{usine}} \geq \varphi_{\text{cogéné}}$ les installations "chaleur-force" où la chaleur constitue le produit de base, l'électricité n'étant qu'un sous-produit permettant de mieux valoriser le combustible. C'est le cas des usines grosses consommatrices de chaleur ou des centrales de chauffage. La priorité est accordée à la fourniture de la chaleur. Dans ce

cas, la force motrice sera supérieure à celle nécessaire à l'usine : l'électricité, facilement transportable, est alors valorisée par revente des excédents sur le réseau ;

- ♣ $\varphi_{\text{usine}} = \varphi_{\text{cogéné}}$ les installations à "énergie totale" qui cherchent à assurer l'autonomie sur le plan électrique, la chaleur étant le sous produit. Il s'agit généralement d'usines non reliées au réseau ou de navires par exemple ;
- ♣ $\varphi_{\text{usine}} \leq \varphi_{\text{cogéné}}$ les installations non autonomes, sous-dimensionnées pour des raisons économiques, pour lesquelles un complément est assuré, pour l'électricité par le réseau, et pour la chaleur par une chaufferie classique d'appoint. L'installation ne fonctionne que quand les tarifs de l'électricité sont élevés et les besoins de chaleur importants. Ce type d'installation est assez fréquent, car c'est souvent celui qui conduit au meilleur bilan financier pour l'entreprise. [Mic05]

5.5. Contexte de production de l'énergie par une centrale de cogénération

Dans une centrale de cogénération à turbine à vapeur, on distingue trois zones essentielles de conversion d'énergie (figure I.9).

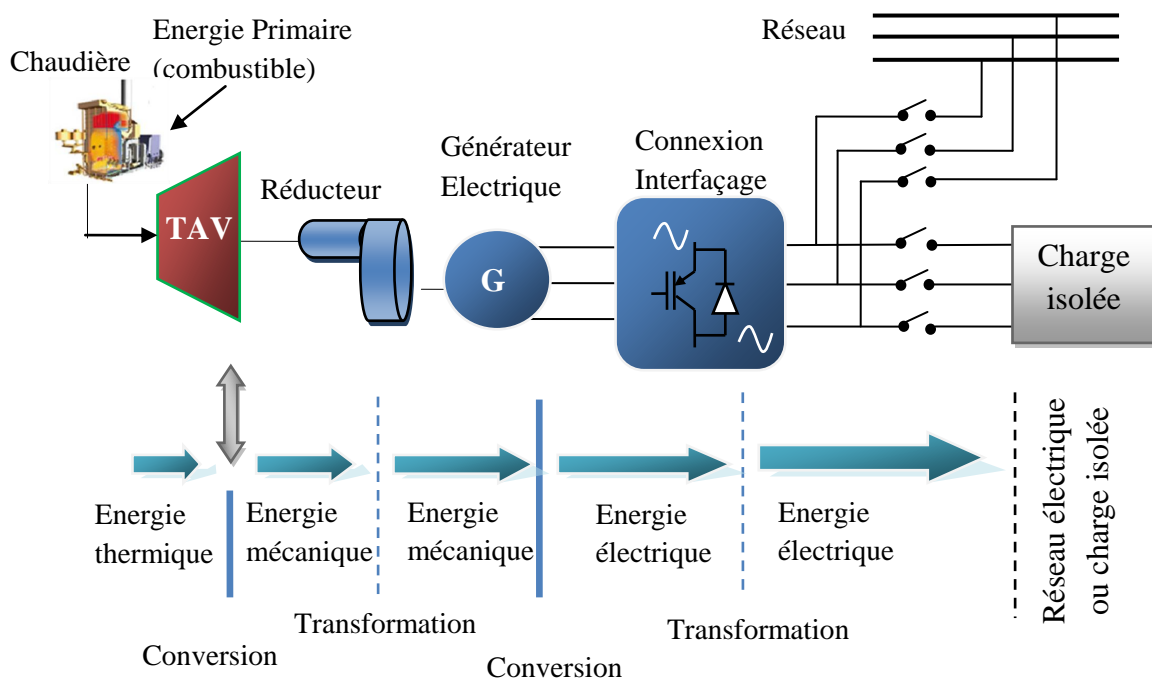


Figure I.9 : Chaîne de transformation d'énergie d'une centrale de cogénération

- ♣ **Combustion :** transformation de l'enthalpie de formation contenue dans un combustible en vapeur sous pression, à haute température. Après préparation convenable du combustible, elle se produit grâce à des brûleurs dans un foyer ; en introduisant de l'oxygène nécessaire à cette combustion sous forme d'air, injecté dans les brûleurs et dans le foyer.

- ♣ Récupération de la chaleur à haute température contenue dans les gaz d'échappements au niveau de la chaudière, qui mettra de la vapeur à disposition finale.
- ♣ Au niveau de la turbine, l'énergie thermique de la vapeur surchauffée est transformée en énergie mécanique, grâce à la vapeur d'eau qui subit une détente à travers les roues de la turbine disponible sur le rotor ;
- ♣ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique du rotor de la turbine et la convertie en énergie électrique, transmise par la suite au réseau électrique ou à une charge isolée.

5.6. Aperçu des techniques de cogénération

5.6.1. Technologies courantes

Les installations de force motrice classiques les plus utilisées pour les applications de cogénération sont du type turbine à vapeur, turbine à gaz et moteur à piston.

5.6.1.1. Turbine à vapeur

Cette technique, réservée aux industriels pouvant produire de grandes quantités de vapeur, permet de produire de l'électricité lorsque la vapeur est produite en excédent, permettant de régulariser sa consommation, par conversion énergétique. C'est aussi la principale technique utilisée dans les grosses centrales électriques, nucléaires ou à combustibles fossiles, pour convertir l'énergie thermique du combustible en électricité (figure I.10).

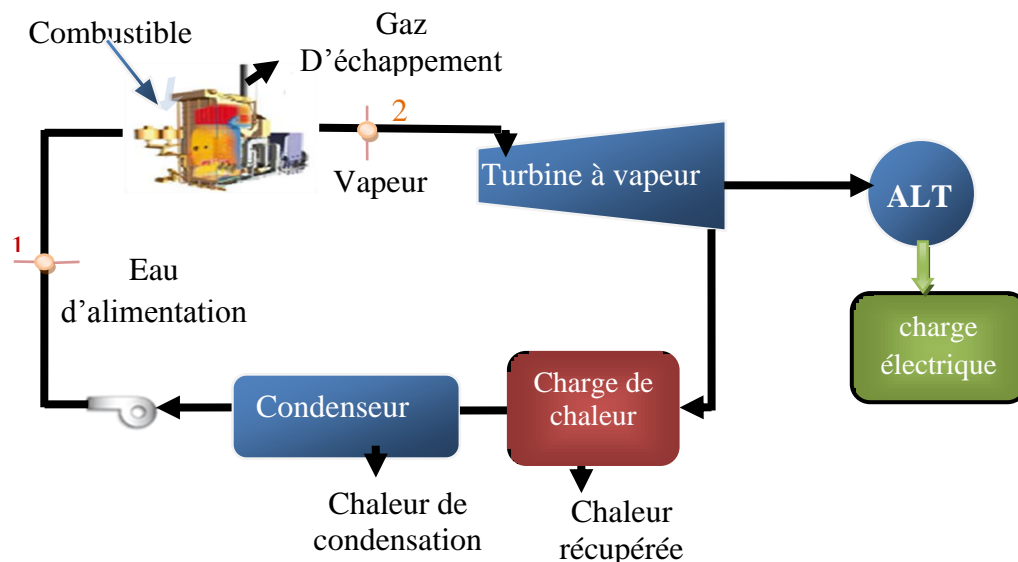


Figure I.10 : Schéma de principe de la cogénération à l'aide de la TAV

La cogénération par turbine à vapeur permet d'utiliser des sources d'énergie primaires variées, dont entre autres les sources d'énergie diverses issues de la valorisation des déchets de

l'industrie, de l'incinération des déchets ménagers ou de la biomasse. Elles sont présentes dans les centrales électriques courantes. Le schéma de principe est représenté dans la figure (I.10). Plus la qualité de vapeur mise à disposition augmente, plus la puissance mécanique livrée par la turbine diminuera. Selon les pressions et les températures choisies du courant du processus, le rapport chaleur/force peut adopter des valeurs allant de 3 à 4. [Jea07]

Le tableau (I.2) donne les principaux avantages et inconvénients de la technologie à base des turbines à vapeur (TAV).

Tab. I.2 : Caractéristiques d'une turbine à vapeur. [Yve09]

Avantages	Inconvénients
Convient à tous types de combustibles	Peu intéressant pour les faibles besoins de chaleur
Très bon rendement global	
Coût d'entretien modique	Investissement élevé
Durée de vie élevée	Fonctionnement quasi-continu
Convient bien lorsque les besoins de vapeur sont nettement plus importants que les besoins électriques.	

5.6.1.2. Turbine à gaz

Il s'agit d'une technologie dérivée des réacteurs d'avion. Le combustible (généralement du gaz naturel) est brûlé dans une chambre de combustion alimentée en air sous pression en provenance d'un compresseur. Les gaz produits sont introduits dans une turbine où leur énergie est transformée en énergie mécanique pour l'entraînement du compresseur d'air et d'un générateur d'électricité (figure I.11).

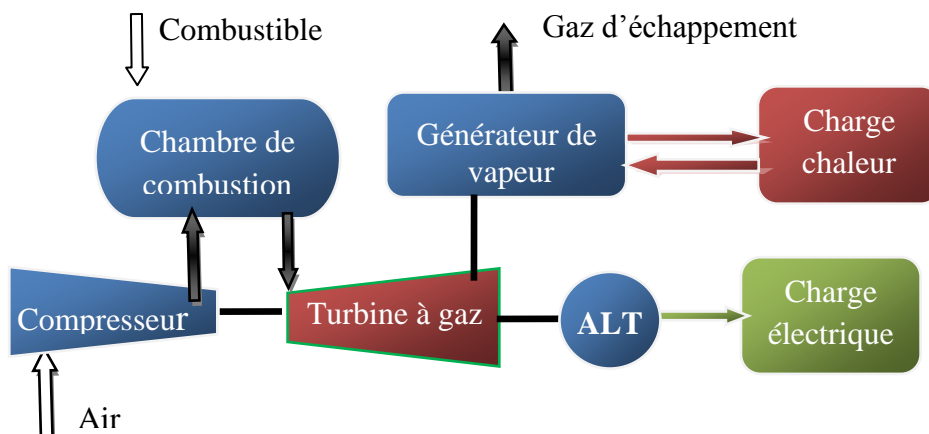


Figure I.11 : Schéma de principe de la cogénération à l'aide de turbine à gaz

L'énergie résiduelle, sous forme de gaz chauds (environ 500 °C), peut être utilisée pour combler les besoins de chaleur (vapeur et/ou eau chaude) [Yve09, Ism09]. Concernant les turbines à gaz, il suffit de dire qu'il s'agit d'un mécanisme à combustion interne, où, le fluide thermodynamique est composé du mélange réactif combustible-carburant (air). Le tableau (I.3) donne les principaux avantages et inconvénients de la technologie à base des turbines à gaz.

Tab. I.3 : Caractéristiques d'une turbine à gaz [Yve09]

Avantages	Inconvénients
Puissance à partir de 30 kW	Faible rendement électrique pour les petites puissances
Production aisée de vapeur	
Bon rendement global	Nécessite en général du gaz naturel

5.6.1.3. Moteur à piston (à gaz et au diésel)

Comme moteurs à piston typique pour application de cogénération ; les moteurs diesel servent à générer les puissances élevées (100 kW à 60 MW), tandis que les moteurs à gaz, qui sont en fait une version légèrement modifiée de la version des moteurs à essences, sont plutôt employés pour les puissances basses (allant de 5 kW à 4 MW) (figure I.12).

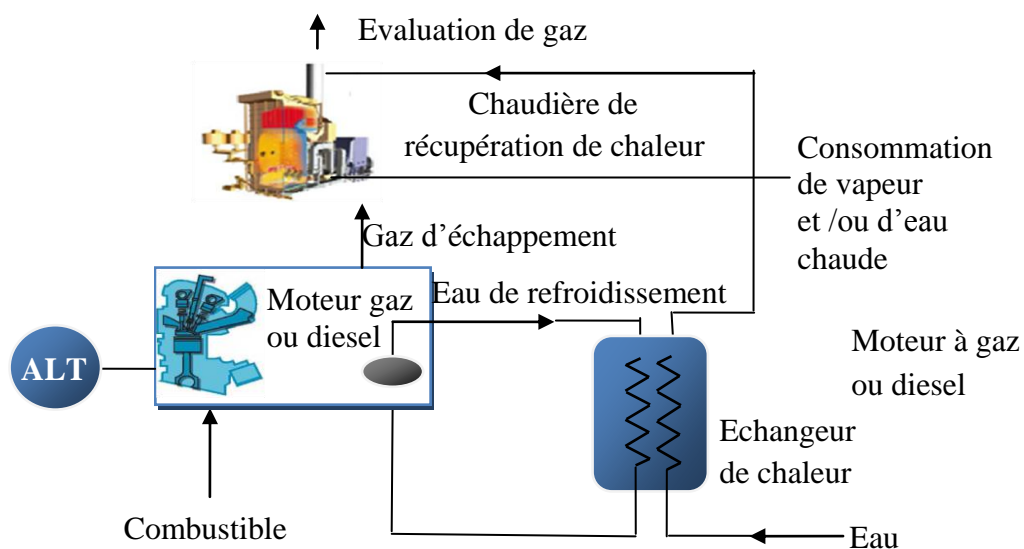


Figure 1.12 : Schéma de principe de la cogénération basée sur un moteur à piston

Les moteurs de petite puissance sont jusqu'à présent peu rentables, leur coût d'achat et d'entretien ne permettant pas souvent de rentabiliser de tels investissements. La hausse continue du coût des énergies fossiles pourrait changer les choses à moyen terme. [Jea07]

Le tableau (I.4) donne les principaux avantages et inconvénients de la technologie à base des moteurs à piston.

Tab. I.4 : Caractéristiques d'un moteur à piston [Yve09]

Avantages	Inconvénients
Puissance à partir de 5 kW	Coût de maintenance assez élevé
Bien adapté à la préparation d'eau chaude	
Bien adapté pour des besoins électriques du même ordre de grandeur que les besoins de chaleur	Peu propice à la production de vapeur
Coût d'achat abordable	Durée de vie limitée (10 à 15 ans)
Bien adapté pour suivre une demande variable	Entretiens programmés indispensables
Peut jouer le rôle de groupe de secours d'appoint en cas de panne	

5.6.1.4. Centrales TGV

On peut aussi combiner turbine à vapeur et turbine à gaz. Comme dit précédemment, la turbine à gaz peut produire de la vapeur à travers une chaudière de récupération, avec ou sans post-combustion. Cette vapeur peut aussi entraîner une turbine à vapeur au lieu d'être employée directement dans un process, et avec un alternateur placé sur l'axe de la turbine à vapeur, on peut ainsi produire un complément d'électricité. La demande en chaleur peut être assouvie par de la vapeur à la sortie de la seconde turbine. De pareilles configurations permettent un haut rendement électrique, ce qui se traduit par un rendement thermique plus faible. (figure I.13). [Gon06]

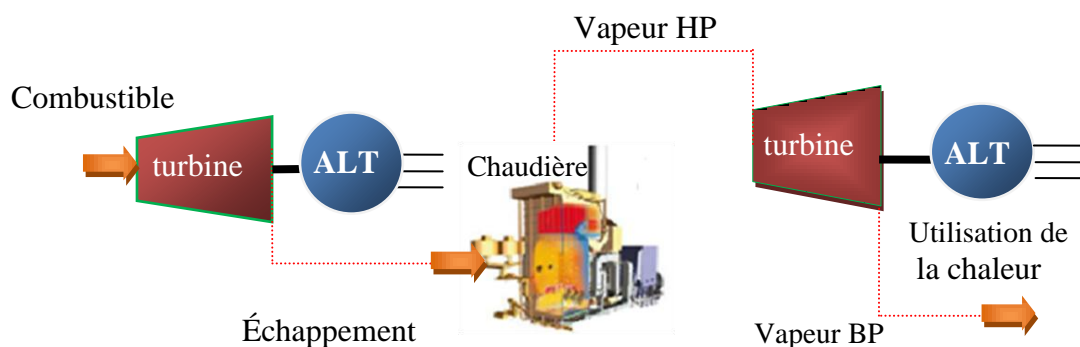


Figure I.13 : Schéma de principe de la cogénération à cycle combiné

Le tableau I.5 présente les caractéristiques des technologies des centrales de cogénération en fonction de la puissance, du rendement, du rapport E/Q et des applications appropriés.

Tab. I.5 : Caractéristiques des technologies des centrales de cogénération [IEPF03]

Technologie	Puissance	Rapport E/Q	Rendement	Application appropriés
Turbine à vapeur	Biomasse : jusqu'à 5MW Fossile : jusqu'à des centaines de MW	>0	> 0,85	Besoin élevé en vapeur de procédé (agroalimentaire, papeteries)
Turbine à gaz	500 kW-300 MW 20 kW-1 MW (en développement)	0,5 – 0,8 0,3 – 0,45	0,6 – 0,8 0,5 – 0,7	Industries et secteur tertiaire
Moteur à combustion interne	2,5 kW – 6100 kW (gaz) 5 kW – 1700 kW (diesel)	0,4 – 0,9	0,8 – 0,9	Besoins en chaleur à basse température (résidentiel, hôpitaux, commercial, bâtiments, certaines industries)
Moteurs à combustion externe	1-15 kW 50 kW (en développement)	0,3 – 0,4	0,5 – 0,7	Résidentiel, commercial, petites industries

5.6.2. Technologies émergentes

5.6.2.1. Moteur Stirling

Le moteur Stirling a été imaginé, puis breveté en 1816, par Robert Stirling [Sto04]. Ces moteurs forment, avec les moteurs Ericsson, la famille des moteurs thermiques dits "à air chaud" ou "à gaz chaud" [Des98, Mag98]. Contrairement à ce que pourrait laisser penser la dénomination "moteur à air chaud", le fluide de travail de ces moteurs n'est aujourd'hui plus de l'air, mais principalement de l'hélium (He), du dihydrogène (H₂) ou du diazote (N₂).

Le moteur Stirling est basé sur un cycle thermodynamique qui, théoriquement, atteint un rendement de Carnot. Le cycle Stirling se déroule entre deux isothermes et deux isochrones (figure I.14).

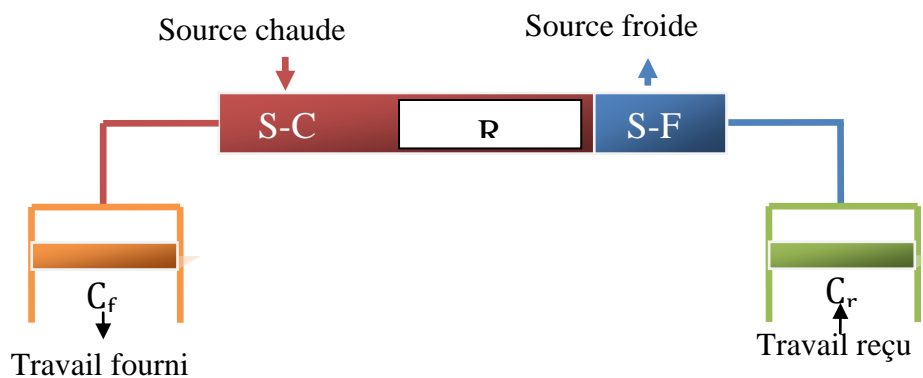


Figure I.14 : Schéma de principe de la structure du moteur Stirling [Séb05]

5.6.2.2. Pile à combustible

Les piles à combustible sont des appareils électrochimiques qui transforment l'énergie chimique directement en électricité. Le noyau de la pile à combustible est une cellule élémentaire. Cette cellule est responsable de la conversion électrochimique de l'énergie chimique contenue dans un combustible en une énergie électrique. La structure de base d'une cellule est formée d'un milieu conducteur ionique ou un électrolyte en contact avec une anode et une cathode de chaque côté comme montré dans la figure (I.15). [Wal08]

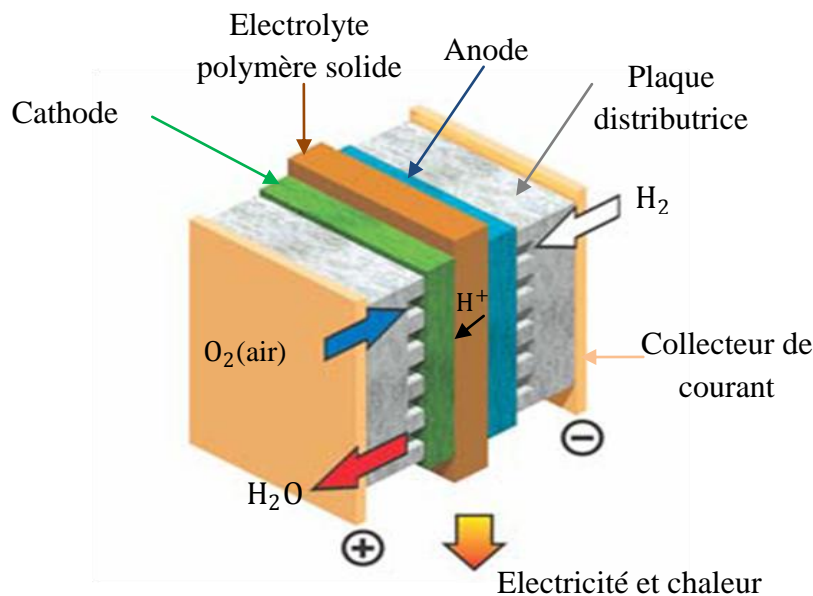


Figure I.15 : Structure de base d'une PAC. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons [CEA04]

La cogénération par pile à combustible semble être une voie prometteuse. Cette technologie, si elle existe sur son principe depuis 1839, inventée par Sir William Grove, n'est toujours pas arrivée à maturité. La technologie permet d'envisager des applications tant domestiques (chauffage et production électrique des maisons individuelles) qu'industrielles. Le rendement est meilleur que celui de la cogénération par moteur ou turbine et la pollution moindre. [Mak08]

5.7. Critères de performance des centrales de cogénération

En toute rigueur, on désigne par cycle une évolution thermodynamique fermée où l'état final coïncide avec l'état initial. Dans ce type de cycle fermé, la machine est sans cesse parcourue par les mêmes molécules de fluide.

Par abus de langage, le terme de cycle a été étendu à toute évolution thermodynamique d'ensemble : d'où la notion de cycle ouvert qui désigne une évolution thermodynamique où l'état final diffère de l'état initial. Par ailleurs, il est nécessaire de distinguer entre cycle idéal et cycle réel. On appelle cycle idéal, tout cycle thermodynamique dans lequel les rendements de compression et de détente sont supposés égaux à 1. Il est évident que le cycle idéal est purement théorique et ne s'applique pas, en toute rigueur, aux machines réelles, mais il renseigne cependant sur le niveau maximal des performances.

5.7.1. Cogénération à base des turbines à vapeur

Le cycle de Rankine (de William J. Rankine, ingénieur et physicien écossais, 1820 – 1872) est le cycle de base des machines thermodynamique utilisant de l'eau comme fluide de travail dans les centrales thermiques, classiques ou nucléaires (figure. I.16). [Gon06]

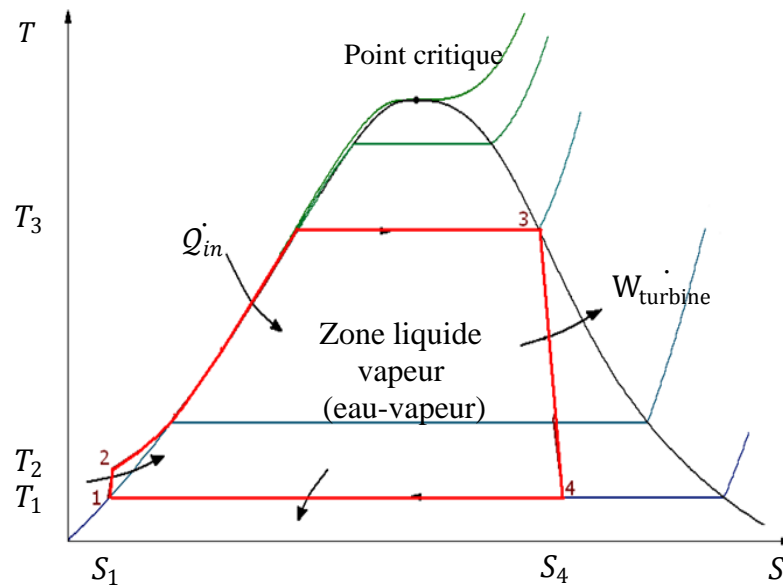


Figure I.16 : Représentation du cycle de Rankine dans le diagramme T-S de l'eau

♣ Equations thermiques [Gon06]

$$\begin{cases} \frac{W_{\text{pomp}}}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \\ \frac{W_{\text{turbine}}}{\dot{m}} = h_3 - h_4 \\ \eta_{\text{therm}} = \frac{W_{\text{turbine}} - W_{\text{pomp}}}{\dot{Q}_m} \approx \frac{W_{\text{turbine}}}{\dot{Q}_m} \end{cases} \quad (\text{I. 2})$$

$$\begin{cases} \frac{\dot{Q}_m}{\dot{m}} = h_3 - h_2 \\ \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{m}} = h_4 - h_1 \end{cases} \quad (\text{I. 3})$$

5.7.2. Cogénération à base des turbines à Gaz

Le cycle de Joule, appelé cycle de Brayton, est le cycle de base des machines thermique utilisant de l'air comme fluide de travail dans les centrales thermiques à base des turbine à gaz figure (I.17). [Cab09]

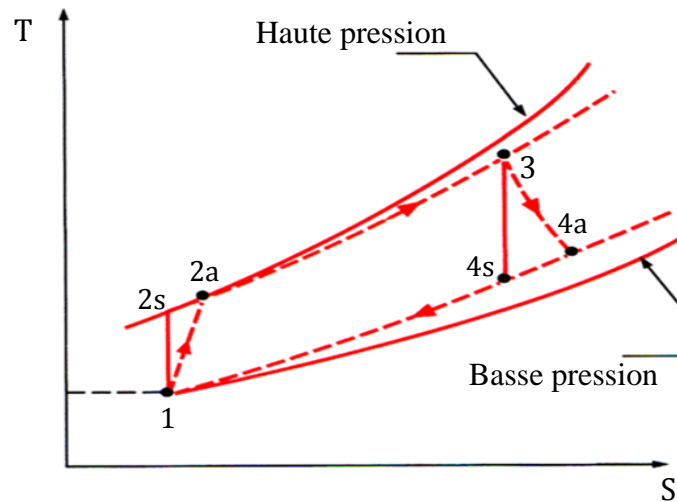


Figure1.17 : Cycle d'une turbine à gaz idéal-Cycle de Brayton [Cab09]

♣ Rendement mécanique

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{méca}} = \left| \frac{W_{\text{net}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \right| = \frac{\dot{Q}_{\text{in}} + \dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} = 1 + \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \\ \dot{Q}_{\text{out}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot C_{p_{\text{air}}} \cdot (T_1 - T_4) \\ \dot{Q}_{\text{out}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot C_{p_{\text{air}}} \cdot (T_3 - T_2) \\ \eta_{\text{méca}} = 1 + \frac{T_1 - T_{4\text{-is}}}{T_3 - T_{2\text{-is}}} \end{array} \right. \quad (\text{I.4})$$

♣ Travail spécifique

$$w_{\text{spec}} = \frac{W_{\text{net}}}{\dot{m}_{\text{air}}} = - \frac{\dot{Q}_{\text{in}} + \dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \quad (\text{I.5})$$

♣ Rendement isentropique

$$\eta_{\text{isen -compresseur}} = \frac{W_{\text{is-comp}}}{W_{\text{réel-comp}}} = \frac{h_1 - h_{2\text{-isem}}}{h_1 - h_2} \quad (\text{I.6})$$

$$\eta_{\text{isen -turbine}} = \frac{W_{\text{is-tur}}}{W_{\text{réel-tur}}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4\text{-iesm}}} \quad (\text{I.7})$$

5.8. Avantages de la centrale de cogénération

5.8.1. Avantages économiques

a). Une réduction significative de la facture d'achat d'électricité :

Pour un propriétaire d'une unité de cogénération, la facture d'achat d'électricité diminuera de manière significative suite à :

- ♣ une diminution de la pointe quart-horaire ;
- ♣ une baisse de la quantité d'électricité achetée au réseau ;
- ♣ un régime tarifaire parfois plus intéressant.

b). Une centrale de cogénération permet une meilleure exploitation de l'énergie contenue dans le combustible, c'est-à-dire que pour la même énergie électrique et thermique utilisée, on consomme moins de combustible. [Umb03]

5.8.2. Avantages sociaux

Une cogénération ne remplace pas totalement une chaudière, mais elle la complète utilement. Cet investissement supplémentaire est donc synonyme de la création de nouveaux emplois, tant pour l'étude technique détaillée, de préférence précédée d'une étude de faisabilité, que pour l'installation et l'entretien de cette cogénération dans votre établissement. [Umb03]

5.8.3. Avantages environnementaux

♣ De l'énergie pour nos enfants :

Contrairement à ce que pourrait laisser croire la mondialisation des échanges, l'abondance des ressources énergétiques n'est qu'apparente et l'approvisionnement n'est pas acquis. En effet, les ressources fossiles sont épuisables. A consommation constante, les réserves prouvées de gaz seront complètement épuisées d'ici environ 60 ans, celles du pétrole d'ici à peine 40 ans. En tant que détenteur d'une unité de cogénération vous contribuez fortement à prolonger les dernières réserves d'énergie fossile, dans la mesure où cette technologie permet une économie d'énergie primaire significative voire d'utiliser un combustible renouvelable comme la biomasse.

- ♣ Une faible consommation de combustible implique une grande diminution d'émissions nocives dans l'environnement et par conséquent, une diminution des coûts sociaux de la pollution.
- ♣ Sauvegarde des ressources d'énergie primaire : la cogénération permet une utilisation plus efficace des ressources énergétiques traditionnelles (pétrole, charbon, gaz naturel), et en réduit le gaspillage.

- ♣ Système de récupération CO₂ permet de capter du CO₂ en postcombustion est de récupérer le CO₂ présent dans les fumées en sortie de chaudière. Trois concepts majeurs liés à la récupération du CO₂ se démarquent :
 - Le captage du CO₂ en postcombustion à partir des fumées grâce à un solvant chimique ;
 - L'oxy-combustion qui consiste à brûler le combustible avec de l'oxygène séparé préalablement de l'azote de l'air. Ce procédé permet de concentrer le CO₂ dans les fumées et d'en faciliter la récupération ;
 - La décarbonatation du combustible : conversion en gaz de synthèse (H₂ + CO) suivi d'une conversion du CO en CO₂ dans un réacteur shift. Le captage du CO₂ s'effectue en précombustion, c'est à dire en amont du système de production d'électricité.

6. Générateurs électriques

Les machines principalement utilisées sont : les machines asynchrones (à cage ou à rotor bobiné) et les machines synchrones (excitation par aimants permanents ou par un bobinage alimenté en courant continu). [Aim04, Bar07, Cam03, Han01, Mir05, Mun08]

6.1. Machine asynchrone à cage (fonctionnement à vitesse fixe)

La machine asynchrone à cage est fiable, robuste simple à fabriquer, et assez bon marché. Elle occupe une place intéressante dans la conversion d'énergie [Poi03]. Sa vitesse mécanique est imposée par la fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles dont elle dispose. Le multiplicateur de vitesse à rapport élevé est généralement indispensable. Cependant, l'augmentation du nombre de pôles permet de diminuer la vitesse nominale de la machine mais cela affecte le rendement et le facteur de puissance ainsi que l'augmentation de la masse et du coût de la machine [Mul04]

Le fonctionnement de la machine asynchrone à cage nécessite un apport de puissance réactive. Dans le cas où la machine est connectée au réseau électrique de distribution ou dans un fonctionnement en site isolé, cette puissance est fournie par des condensateurs disposés en parallèle avec l'enroulement statorique [Poi03]

Dans le cas du raccordement direct sur le réseau (fonctionnement en régime normal sans interface d'électronique de puissance), un gradateur permet d'éviter les régimes transitoires perturbateurs du réseau par une mise progressive sous tension de l'enroulement statorique et lorsque le régime permanent est atteint, le gradateur est mis hors circuit, figure(I.18). [Mul04]

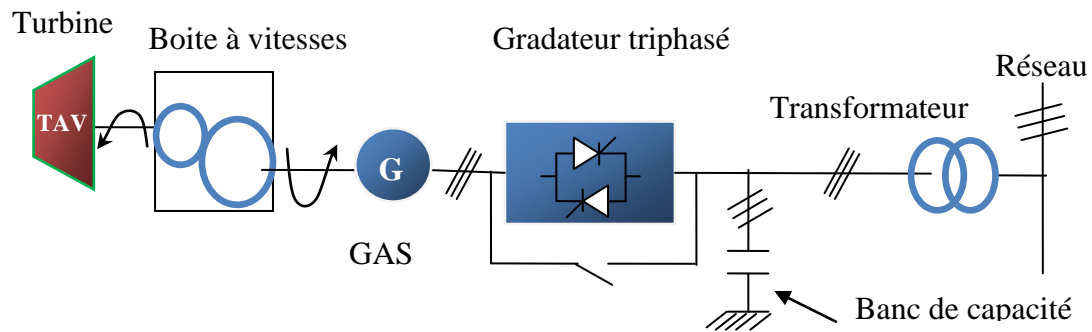


Figure I.18: Système de conversion d'énergie basé sur une génératrice asynchrone à cage (vitesse fixe)

L'utilisation d'un variateur de fréquence, dimensionné pour la pleine puissance convertie par la machine ajoutée à la puissance réactive de magnétisation, permet un réglage de la vitesse. Mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence et multiplicateur de vitesse, figure (I.19)). [Poi03]

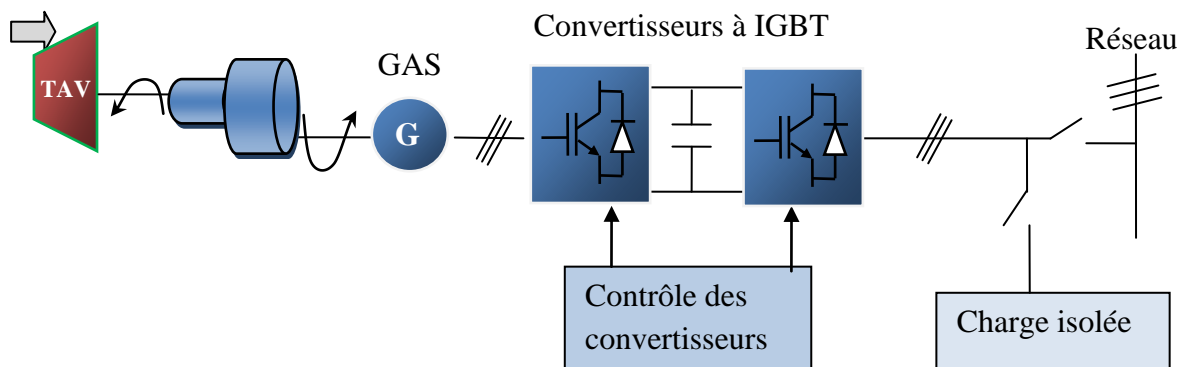


Figure I.19: Système de conversion d'énergie basé sur une génératrice asynchrone à cage à vitesse variable

6.2. Machine asynchrone à rotor bobiné (fonctionnement vitesse variable)

La machine asynchrone à rotor bobiné permet d'exploiter des convertisseurs d'électronique de puissance dimensionnés pour des puissances réduites. Son inconvénient est lié à la maintenance exigée par ses contacts glissants (balais-bagues).

6.2.1. Variation de la résistance rotorique

A l'aide de résistances disposées en série avec les enroulements rotoriques, une interface d'électronique de puissance (redresseur à diode et un hacheur à transistor permet la variation du glissement et donc une variation de la vitesse d'environ 10 % (diminution), figure (I.20) [Mul04, Poi03]

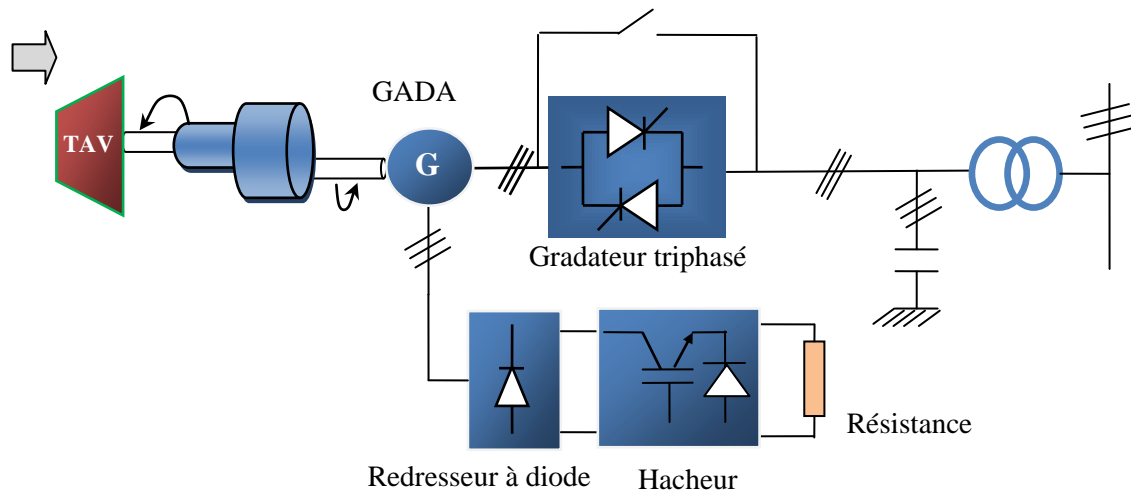


Figure I.20: Système de conversion d'énergie basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec variation de la résistance

Le raccordement au réseau est identique à celui du système à vitesse fixe utilisant la génératrice asynchrone à cage.

6.2.2. Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

Une autre solution intéressante pour cette machine consiste à lier directement le stator de la génératrice au réseau de distribution, alors que son rotor est couplé au stator (cascade) à travers deux convertisseurs MLI (figure I.21). L'avantage principal de cette structure réside dans le fait que les convertisseurs sont dimensionnés pour une fraction de la puissance totale (20-30%). Cela signifie que les pertes dans les convertisseurs, ainsi que leur coût, sont diminués [Aou09]

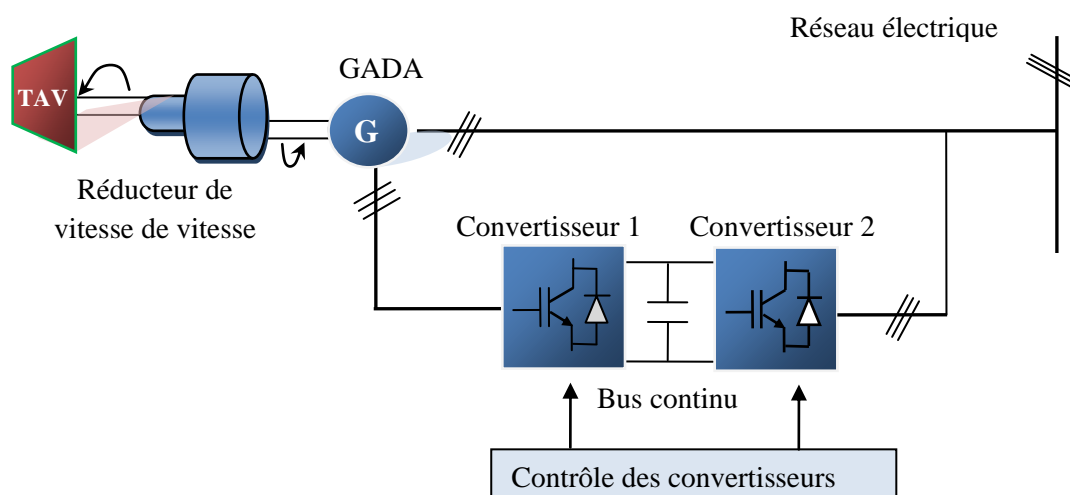


Figure I.21: Système de conversion d'énergie basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec réglage électronique du glissement (fonctionnement à vitesse variable)

6.3. Machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants permanents (MSAP)

La machine synchrone peut être à inducteur bobiné ou à excitation par aimants permanents. Les deux structures associées à la production d'énergie électrique exploitent des interfaces d'électronique de puissance pour le raccordement au réseau ou pour le fonctionnement autonome [San08]. Elle est considérée comme une solution concurrente à la GADA, en raison des nombreux avantages qu'elle possède [Mul04]:

- ✓ Vitesse variable à 100 % ;
- ✓ Puissance massique importante (cas de la MSAP);
- ✓ Réglage du circuit d'excitation (MS à rotor bobiné), ce qui procure un moyen supplémentaire de contrôle,
- ✓ Couplage rigide au réseau de distribution via un convertisseur.

Cependant, quelques contraintes limitent l'utilisation de la MS à inducteur bobiné :

- ✓ Entretien des contacts glissants (balais-bagues) ;
- ✓ Nécessité d'une alimentation auxiliaire en continu pour le circuit d'excitation ;
- ✓ Le surcoût engendré par le dimensionnement du convertisseur de puissance pour la totalité de la puissance produite.

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type, à grand nombre de pôles, permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications de production d'énergie électrique, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. [Mir05, Mul99].

7. Etude énergétique de la centrale de cogénération

7.1. Description de l'architecture du système modélisé

La centrale modélisée produit de l'électricité, fournit de la chaleur pour les différents processus des unités du complexe (deux raffineries de sucre 1600T/j, 3000T/j et la raffinerie d'huile). C'est une installation de type chaleur-force, où la chaleur constitue le produit de base, l'électricité étant un sous produit, qui sert à l'alimentation du complexe, l'excès sera vendu à SONELGAZ. Le réseau de chauffage est un circuit de vapeur à basse pression dont

la température est comprise entre 100°C et 120°C. Le circuit part de la centrale à sa température maximale, puis il parcourt les raffineries de sucre, d'huile et les sous-stations (réchauffage d'eau sanitaire). Enfin il revient à la centrale à sa température minimale. L'installation comporte trois circuits essentiels:

- ♣ Chaudière de récupération (à tube d'eau), elle est composée d'un foyer (chambre de combustion), lieu de combustion ; (pour plus de détail voir le chapitre II)
- ♣ Turbo-alternateur : est actionné par la vapeur produite par le générateur de vapeur (Chaudière). La turbine transforme la pression de la vapeur en énergie cinétique de rotation ;
- ♣ Evapocondenseurs (échangeur thermique) : c'est l'endroit où la vapeur sortante de la turbine subit une condensation, en transformant en parallèle une eau chaude en vapeur pour le réseau du processus du « complexe Cevital » (voir l'annexe A).

7.2. Ressources en énergie primaire

Le complexe agroalimentaire utilise le gaz naturel comme source d'énergie primaire. Sa consommation actuelle pour la production est de l'ordre de $54,19 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{an}$.

Le gaz naturel est un gaz incolore, inodore et inflammable quand on l'extrait du sous-sol. Afin de pouvoir le détecter en cas de fuite, on lui ajoute une odeur caractéristique. C'est le combustible fossile le plus "propre". Sa combustion ne génère ni poussière, ni suie, ni fumée. Elle dégage du dioxyde de carbone CO_2 , de la vapeur d'eau, un peu d'oxyde d'azote NO_x et très peu de dioxyde de soufre SO_2

Pour une production d'énergie équivalente, il dégage [\[Dav01\]](#):

- ♣ deux fois moins d'oxyde d'azote que le fioul et le charbon ;
- ♣ 30 % de moins de dioxyde de carbone que le fioul lourd (fioul non catalysé) ;
- ♣ 45 % de moins de dioxyde de carbone que le charbon.

7.3. Evaluation de l'avantage énergétique de la cogénération

7.3.1. Puissance introduite

Par définition, on considère comme puissance introduite par le combustible celle qui résulterait de la combustion complète de la totalité du combustible préparé et introduit dans le système, avec son pouvoir calorifique normal, ce qui équivaut à compter comme pertes, la chaleur qui aurait été produite par la combustion de ces imbrûlés [\[Jea07\]](#)

$$\dot{Q}_{\text{the}} = \dot{m}_v \cdot \Delta H \quad (\text{I.8})$$

7.3.2. Puissance électrique maximale d'une cogénération

C'est la puissance maximale, active uniquement, qui peut être produite en continu par la centrale sur une période de fonctionnement prolongée, en admettant en outre une fourniture de chaleur dont l'importance et le mode de réalisation soient, parmi toutes les hypothèses envisageable, celles-ci permettent d'attendre des conditions climatiques moyennes sur le site. Le rendement électrique de la cogénération est donné par la relation (I.9) [Jea07]

$$\alpha_E = \frac{\dot{E}_{\text{ele}}}{\dot{Q}_{\text{int}}} \quad (\text{I.9})$$

7.3.3. Puissance thermique maximale utile

C'est la puissance thermique contenue dans le fluide chaud qui circule dans le réseau de chauffage déduction faite, le cas échéant, de la puissance thermique restituée à l'installation par fluide de retour du réseau. Le rendement thermique de la cogénération est donné par la relation [Jea07]

$$\alpha_{\text{the}} = \frac{\dot{Q}_{\text{the}}}{\dot{Q}_{\text{int}}} \quad (\text{I.10})$$

On peut définir un rendement global d'une centrale de cogénération comme le rapport entre la puissance totale utilisable au circuit de chauffage et la puissance nécessaire pour l'utilisation du combustible. Ce rendement global n'est pas le rendement complet au sens thermodynamique. L'équation additionne deux quantités énergétiques ayant des qualités très différentes. Il est recommandé de parler du taux d'utilisation de combustible α_{tot} d'une installation de cogénération [Jea07]

$$\alpha_{\text{tot}} = \frac{\dot{Q}_{\text{the}} + \dot{E}_{\text{ele}}}{\dot{Q}_{\text{int}}} = \alpha_{\text{the}} + \alpha_E \quad (\text{I.11})$$

7.3.4. Rendement exergetique d'une cogénération

La méthode la plus correcte pour caractériser les performances d'une installation de cogénération est d'utiliser le rendement exergetique. Si la chaleur utile a été fournie à une température T, le rendement exergetique est égal : [Jea07]

$$\alpha_{\text{ex}} = \alpha_E + \alpha_{\text{the}} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (\text{I.12})$$

7.3.5. Economie d'énergie de la cogénération par rapport à une production séparée

Selon le schéma de la figure (I.6), il s'avère que l'utilisation de la cogénération pour produire une quantité d'électricité $\dot{E} = \alpha_E$ et de chaleur $\dot{Q} = \alpha_{the}$ résulte en une économie d'énergie primaire, EEP (parfois appelé aussi économie de puissance primaire):

$$EEP = \frac{\alpha_E}{\eta_E} + \frac{\alpha_{the}}{\eta_{the}} - 1 \quad (I.13)$$

L'économie d'énergie relative, par rapport à la production séparée et établie en divisant l'équation (I.13) par la consommation de combustible de cette production séparée. Ceci donne :

$$EEP_{relative} = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_E}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\eta_Q}} \quad (I.14)$$

L'indice de qualité d'une centrale de cogénération est défini comme suit :

$$I_Q = 1 - \frac{1}{1,82\alpha_E + 1,11\alpha_Q} \quad (I.15)$$

Si $I_Q > 5\%$, l'installation de cogénération reçoit le label de cogénération de qualité, ce qui signifie que l'installation de cogénération consomme 5% de combustible en moins que la production séparée avec une TGV et une chaudière. [Jea07]

Le tableau (I.6) représente les caractéristiques des réseaux de chaleur et électrique et les résultats du bilan énergétique. (Voir annexe A)

Tab. I.6 : Résultats de calcul des réseaux de bilan énergétique

	Départ	Retour
Débit vapeur	(150t/h)/chaudière	
T (°C)/P (bar)	140/2,7	100/1,2
H (kJ/kg)	2719,9	440,19
\dot{Q}_{int} (MW)	267,87	
\dot{Q}_{the} (MW)	189,98	
\dot{E}_{ele} (MW)	50,2	
$\dot{Q}_{the}/\dot{E}_{ele}$	3,78	
α_Q %	70,92	
α_E %	18,74	
$\alpha_{tot}/\alpha_{ex} / I_Q$ (%)	89,66 / 85,97 / 11,37	

D'après les résultats obtenus, on constate que :

- ♣ La chaleur constitue le produit de base avec un rendement de 70,92%, comparé au rendement électrique qui est égale à 18,74% , d'où l'installation de cogénération modélisée correspondant au type de la technologie choisie (à base des turbines à vapeur), avec un rapport chaleur - force de 3,78 ;
- ♣ L'indice de qualité est supérieur à 5%, c'est-à-dire une réduction de consommation de 11,37% de combustible en moins que la production séparée.

Le diagramme de la figure (I.22) présente le bilan de puissance de la centrale modélisée.

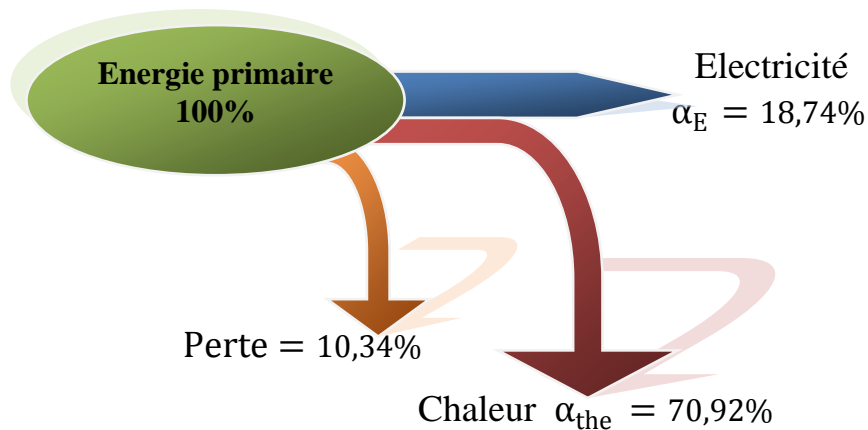


Figure I.22 : Bilan de puissance de la centrale modélisée

Le tableau (I.7) donne les différentes grandeurs de puissances, rendement électrique, rendement thermique et le rendement global des installations selon la technologie utilisées. On remarque que pour une technologie à base des TAV le rendement thermique est compris entre 60 – 75% , et le rendement électrique entre 1 – 35% . D'après les résultats de calcul obtenus sur la centrale modélisée, on constate bien que la centrale de cogénération modélisée correspond à la technologie à base des turbine à vapeur.

Tab. I.7 : Ordre de grandeur des rendements de la cogénération [Umb03]

Technologie	Puissance (MW)	Rendement électrique	Rendement thermique	Rendement globale(%)
Moteur à combustion interne	0,05 – 10	0,25 – 0,40	0,25 – 0,40	/
Turbine à gaz	0,08 – 180	0,20 – 0,38	0,35 – 0,50	70 – 85
Turbine à vapeur	0,5 – 250	0,10 – 0,35	0,60 – ,075	80 – 90
Cycles combinés	> 5	0,4. –0,55	0,10 – 0,45	/

8. Estimation de la rentabilité du projet

Le premier critère de rentabilité est d'avoir un gain annuel net positif. Le gain annuel net est la différence entre la somme de tous les gains et la somme de toutes les dépenses.

$$\text{Gain}_{\text{annuel net}} = \text{Gain}_{\text{éle}} + \text{Gain}_{\text{chal}} + \text{Gain}_{\text{CV}} - \text{Dépense}_{\text{comb}} - \text{Dépense}_{\text{entre}} \quad (\text{I. 16})$$

Un deuxième critère, qui a l'avantage de montrer l'intérêt financier d'un projet, est le temps de retour simple sur investissement. C'est la période, exprimée en années, au terme de laquelle tous les gains ont permis de rembourser l'investissement initial net. L'investissement pour une centrale de cogénération comprend: [Yve09]

- ♣ le coût des équipements;
- ♣ le coût d'installation ;
- ♣ les frais généraux.

$$\text{Temps de retour simple} = \frac{\text{Investissement}_{\text{net}}}{\text{Gain}_{\text{annuel net}}} \quad (\text{I. 17})$$

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau I.8 :

Tab. I.8 : Résultats de d'estimation de la rentabilité du projet étudié

	Gain (DA/ans)	Investissement net (DA)	Temps de retour (ans)
Gain électrique	886 540 032	3 470 405 407	5,35(5 ans et 4 mois)
Gain CV	0		
Gain dépense gaz	207 369 953,30		
Dépense entretien	177 380 006,40		
Gain annuel	648 933 949 ,00		

Interprétation des résultats

L'économie d'énergie procurée par la production combinée dépend fortement de la référence choisie. Chaque cas est spécifique, la décision d'investir dans une unité de cogénération est basée sur une analyse fine des besoins réels d'électricité et de chaleur de l'entreprise mais aussi du coût des investissements et du prix des énergies. D'après les résultats obtenus sur le calcul d'économie d'énergie, on constate que la cogénération modélisée bénéficie de 11,4% d'économie relative en CO₂, ce qui permet de réaliser des gains d'énergie primaire appréciables, qui contribuent également à réduire les émissions de CO₂ rejetées dans l'atmosphère. Du point de vue investissement, on constate que l'entreprise Cevital maîtrise bien ces investissements ; ce qui lui permet de bénéficier des gains importants.

Conclusion

Dans un contexte lié à la conception des systèmes de conversion d'énergie, nous avons présenté les différents concepts de production d'énergie et en particulier la centrale de cogénération, vu que cette dernière s'intègre dans tout établissement possédant des besoins de chaleur et d'électricité importants. En outre, elle apporte de nombreux avantages à son propriétaire, tant du point de vue économique, que du point de vue social et environnemental.

Nous avons abordé aussi les différentes technologies utilisées dans les systèmes de cogénération.

L'exploitation des technologies présentées varie selon les applications, néanmoins, elles doivent assurer : un bon rendement énergétique, une fiabilité élevée et une sécurité d'exploitation.

Afin de classer la centrale et estimer sa rentabilité, nous avons fait une étude énergétique (rendements, l'économie d'énergie et le temps de retour simple). La cogénération est donc une énergie à promouvoir qui permettra une meilleure rentabilité des énergies fossiles.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude du fonctionnement de l'ensemble chaudière-turbine, vis-à-vis des besoins de l'installation.

CHAPITRE II

CONTROLE DE L'ENSEMBLE CHAUDIERE-TURBINE A VAPEUR

Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude du fonctionnement de l'ensemble « chaudière-turbine », le système de contrôle de cet ensemble doit répondre aux exigences suivantes :

- ♣ la puissance électrique de sortie doit suivre la demande par l'envoi,
- ♣ la pression de commande doit être maintenue malgré la variation de la charge,
- ♣ la quantité d'eau dans la chaudière doit être maintenue à un niveau désiré pour éviter une surchauffe de la tubulure et d'éviter une vapeur humide à l'entrée dans la turbine,
- ♣ le mélange de fuel et d'air dans la chambre de combustion doit satisfaire les standards de la sécurité, d'efficacité et la protection de l'environnement, ce qui est assuré en maintenant un niveau désiré d'excès en oxygène.

La première partie est consacrée à la description générale de l'ensemble chaudière-turbine et à sa modélisation, après, nous avons décrit fonctionnellement et technologiquement les divers composants hydrauliques constituant l'ensemble du mécanisme de commande. Le but de ce chapitre est d'établir les caractéristiques dynamiques de l'ensemble (chaudière-turbine) à prendre en compte au niveau du débit de la vapeur produite, le couple mécanique appliqué au rotor du générateur synchrone, et l'action du régulateur de vitesse. Les résultats de simulation et interprétations sont donnés à la fin du chapitre.

1. Chaudière**1.1. Description et constitution**

Le rôle d'une chaudière est essentiellement de transmettre l'énergie apparaissant sous forme de chaleur (avec ou sans combustion) à de l'eau sous pression pour obtenir soit de l'eau surchauffée sous pression, soit de la vapeur ou un fluide à l'état supercritique devenant de la vapeur par détente. De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en général associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique.

La chaudière est de type à tube d'eau, a un réservoir de circulation naturelle. Elle est de type compact en ligne à chambre de rayonnement horizontal équipée de deux brûleurs à gaz naturel bas NOx installés en façade avant la chaudière. Elle comprend essentiellement cinq blocs, la chambre de combustion (foyer), quatre blocs des échangeurs thermiques avec le circuit vapeur. Le premier est un surchauffeur haute température (SHT), le deuxième est un surchauffeur basse température (SBT). Le bloc de surchauffe est séparé par une désurchauffe entre les deux surchauffeurs pour contrôler la température de la vapeur à la sortie de la chaudière. Les deux blocs suivants sont l'évaporateur (EVA) et l'économiseur (ECO) (figure II.1).

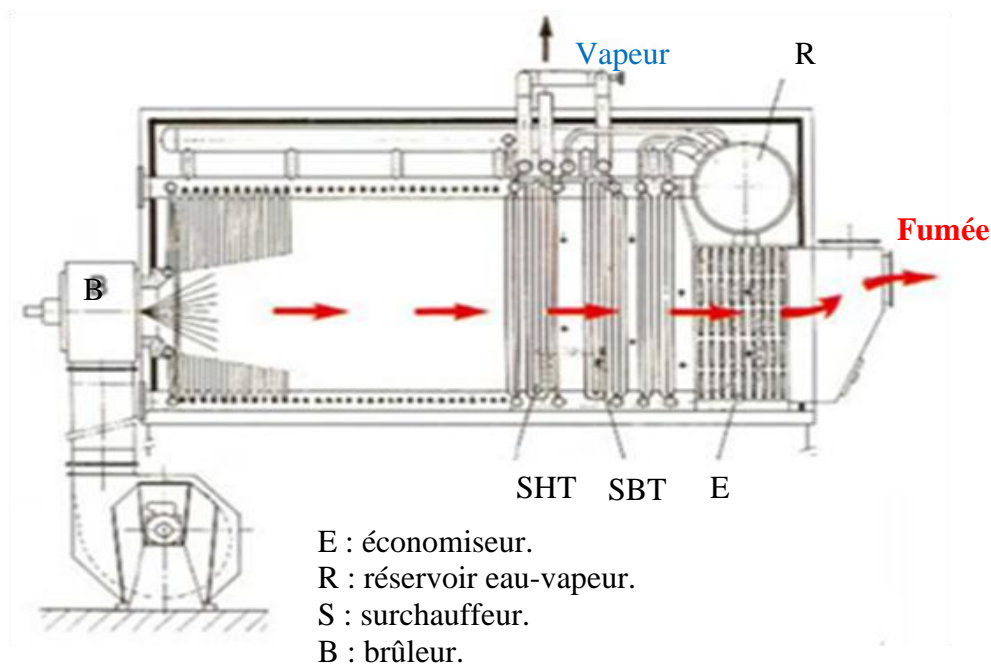


Figure II.1 : Chaudière à circulation naturelle [Jea01]

- ♣ **Economiseur** : l'eau liquide est réchauffée jusqu'à la température d'approche qui se situe à quelques degrés sous la saturation, cette différence de température est une sécurité pour ne pas avoir de vaporisation à l'intérieur des tubes ;
- ♣ **Vaporisateurs** : l'eau reprise à la base du ballon est partiellement vaporisée puis renvoyée dans le ballon ;
- ♣ **Surchauffeur** : situé sur le parcours des fumées entre la sortie du foyer et l'évaporateur, il sert à élever la température de la vapeur depuis l'état saturé. Il se divise en deux étages, un étage à haute température SHT et un étage basse température

SBT disposés verticalement en amont des faisceaux évaporateurs, entièrement vidangeables et démontables.

- ♣ **Déssurchauffeur** : est obtenu par injection de l'eau alimentaire entre les deux étages du surchauffeur (SHT, SBT).

1.2. Rôle de la circulation naturelle

La circulation a deux objectifs principaux :

- ♣ assurer le refroidissement correct des tubes situés dans les zones les plus chaudes ou exposés au rayonnement direct du feu, et qui reçoivent en cet endroit le flux maximal de chaleur,
- ♣ assurer la génération de la vapeur saturée, c'est-à-dire le passage du fluide chauffé de l'état eau à l'état émulsion et vapeur (à l'exclusion des chaudières à pression supercritique pour lesquelles le fluide véhiculé est simplement chauffé). [Jea01]

1.3. Séparation eau/vapeur (ballon)

Le ballon est l'endroit où se passe :

- ♣ la séparation de l'eau et de la vapeur contenues dans l'émulsion en provenance des écrans et des faisceaux vaporisateurs,
- ♣ l'équilibrage des pressions eau/vapeur et l'équilibrage des débits eau/vapeur grâce au maintien d'un plan d'eau,
- ♣ l'introduction de l'eau d'alimentation dans le système évaporatoire,
- ♣ la répartition correcte de l'eau dans les tubes de descente, avec le minimum de stockage partiel.

2. Description de la TAV

Les turbines à vapeur (figure II.2), comme toutes les turbomachines (et contrairement aux machines volumétriques), sont des appareils à écoulement continu, ce qui veut dire que, pour un régime de fonctionnement donné, l'état du fluide est invariable en tout point. Cette propriété leur permet de fonctionner avec des débits très importants et rend possible la réalisation des machines de grande puissance, et cela avec un rendement élevé et avec toute la souplesse de réglage exigée par le fonctionnement des installations modernes. De plus, les turbines à vapeur se prêtent, dans des conditions économiques, à la production simultanée d'énergie électrique et de chaleur. Pour toutes ces raisons, ces machines jouent un rôle de tout

premier plan dans la production d'énergie électrique aux dépens de la chaleur fournie par les combustibles, qu'ils soient classiques ou nucléaires.

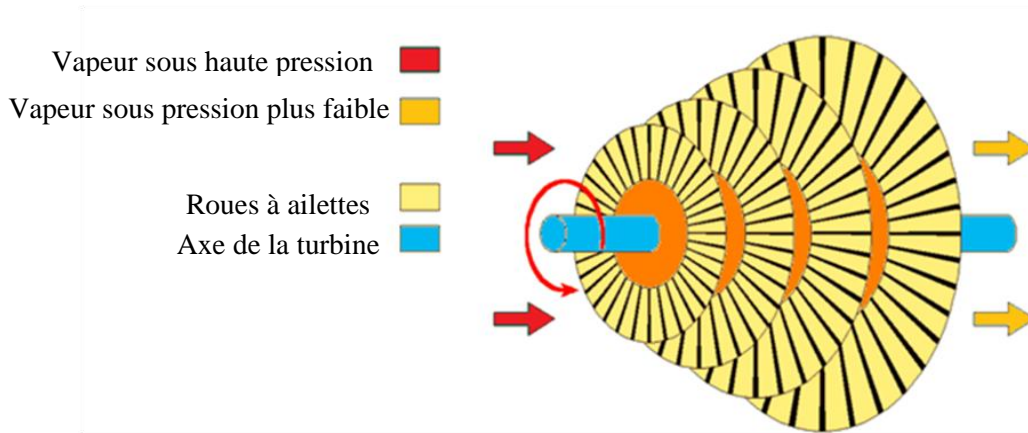
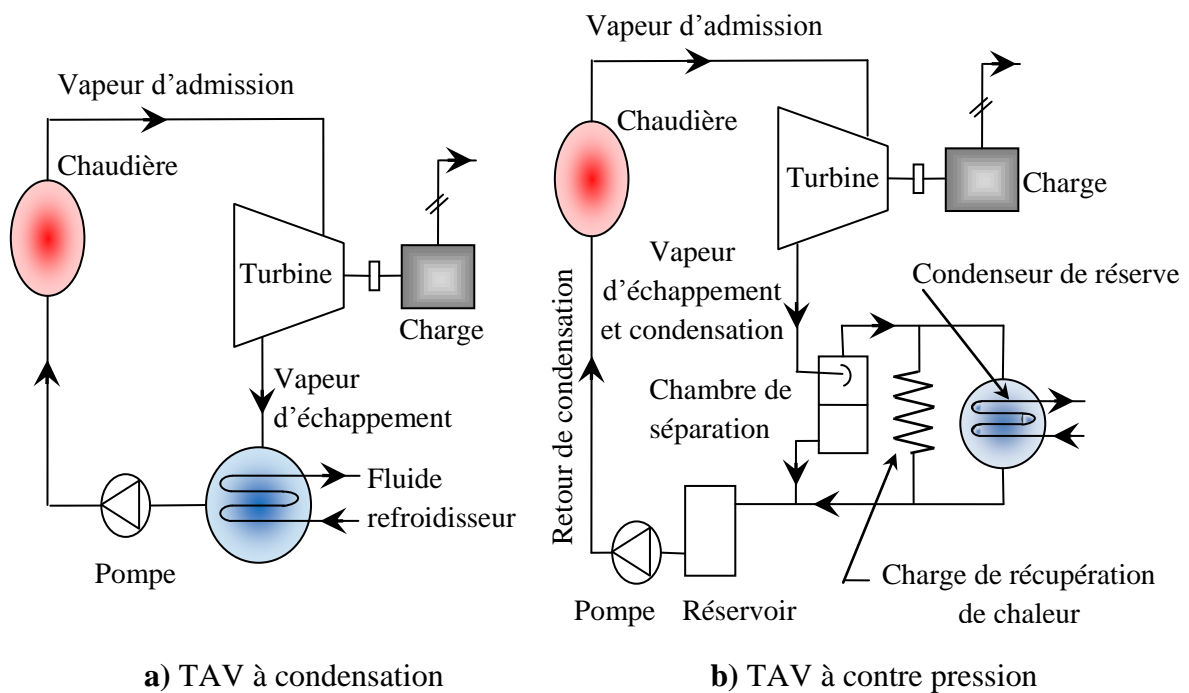


Figure II.2 : Rotor d'une turbine à vapeur [Bru97]

Suivant le cycle thermique décrit par la vapeur, on distingue, entre autres, les turbines à condensation, à contre-pression et à prélèvement de vapeur (figure II.3).



Figures II.3 : Classification des TAV selon leurs utilisations

Dans les turbines à condensation (figure II.3.a), la vapeur d'admission est surchauffée pour minimiser la condensation à l'intérieur de la turbine, la vapeur à l'échappement est à une pression inférieure à la pression atmosphérique. La faible pression d'échappement est

produite par un échangeur de chaleur externe qui refroidit la vapeur et la condense alors qu'elle s'échappe de la turbine.

Quant la détente se termine à une pression absolue telle que l'on se trouve effectivement à une zone surchauffée, la turbine à vapeur est dite à contre-pression (figure II.3.b) : cela correspondant au cas où l'on désire utiliser de la vapeur surchauffée sèche pour une production industrielle de vapeur ou chauffage collectif. [Jea06]

La turbine modélisée est de type à vapeur à contre pression (à action, à écoulement axial), et ayant cinq étage, l'admission de la vapeur se fait par l'intermédiaire d'une vanne d'arrêt munie d'un filtre démontable et de soupapes régulatrices pilotées par un régulateur de vitesse. Les corps de la vanne d'arrêt et des soupapes régulatrices sont équipés de purges reliées au collecteur de purge via des vannes manuelles d'isolement et les orifices. Un manomètre installé sur la purge de la vanne d'arrêt en amont des vannes d'isolement indique la pression de la vapeur à l'admission. La vapeur admise est détendue dans une ou plusieurs tuyères (dans les corps HP, MP, BP). A la sortie de la tuyère la vapeur est animée d'une très grande vitesse. La vapeur percute les ailettes de la roue de la turbine qu'elle met en rotation. A la sortie des ailettes de la roue, la vapeur ressort avec une grande vitesse, elle peut être réutilisée après son passage dans une chambre d'inversion qui lui redonne une orientation correcte vis-à-vis de l'aubage. Puis elle est évacuée par la tubulure d'échappement (figure II.4).

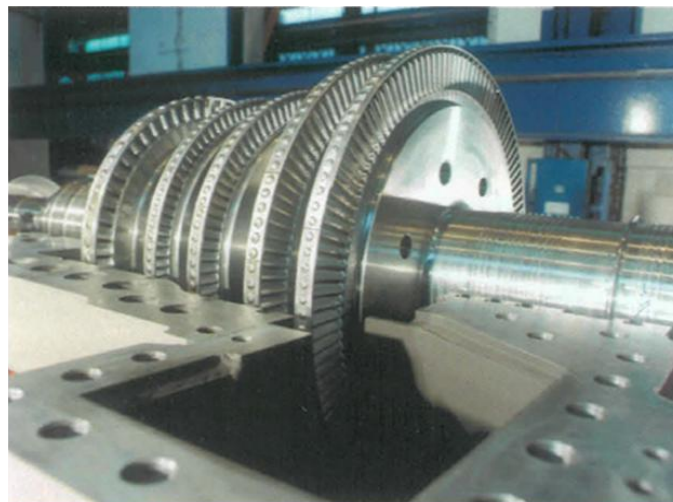


Figure II.4 : Rotor de la turbine « Thermodyn » [Drs08]

2.1. Eléments constitutifs les TAV

Elles sont constituées d'un rotor comprenant un arbre sur lequel sont fixées des aubes et, d'un stator constitué d'un carter portant des déflecteurs fixes, généralement constitués de deux

parties assemblées selon un plan axial. Elles comprennent en outre un tore d'admission segmenté et un divergent d'échappement dirigé vers le condenseur. La fonction des déflecteurs fixes est d'assurer tout ou une partie de la détente en formant un réseau de tuyères et de modifier la direction de l'écoulement sortant de l'étage précédent. Une turbine à vapeur comprend un ou plusieurs étages assurant chacun deux fonctions :

- ♣ La détente de la vapeur qui correspond à la conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique.
- ♣ La conversion de l'énergie cinétique en couple de rotation de la machine par le biais des aubages mobiles.

La turbine à vapeur comporte un seul arbre auquel sont fixées de nombreuses roues à ailettes. Elle est habituellement formée d'une moitié inférieure et d'une moitié supérieure boulonnée, cette dernière pouvant être soulevée pour faciliter l'entretien. Des diaphragmes solidaires du corps portent les ailettes fixes qui forment les tuyères (figure II.5).

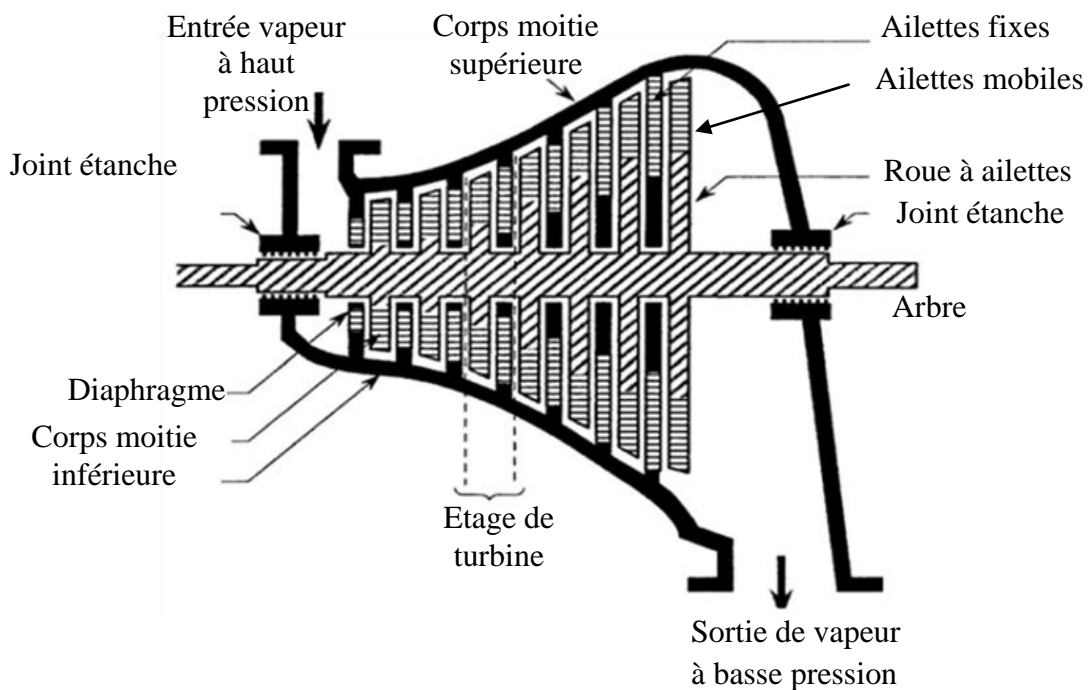


Figure II.5 : Vue en coupe d'une turbine à vapeur (à 7 étages)

2.1. 1. Vanne d'arrêt d'admission à commande hydraulique

La turbine comporte une vanne d'arrêt boulonnée sur le côté de la boîte à vitesse. La soupape de la vanne d'arrêt est équipée d'un pilote ayant pour but de diminuer les efforts d'ouverture.

2.1.2. Soupapes régulatrices

Elles sont sous le contrôle de la régulation qui assure la rapidité, la précision et la stabilité du fonctionnement. On distingue deux types de soupapes :

Les soupapes d'admission du type monobloc sont commandées par l'intermédiaire d'une barre externe actionnée par un servovérin hydraulique haute pression ($\varnothing 80/45/45$) placé sous la dépendance du régulateur de vitesse (figure II.6). Des ressorts de traction à tendance à la fermeture viennent fermer les soupapes lors d'un déclenchement. Pour éviter l'affolement des soupapes les constructeurs utilisent notamment :

- ♣ des ressorts à pas variable;
- ♣ deux ressorts antagonistes (sens d'hélice opposé; le diamètre de l'un n'est que de 0.5 mm supérieur au diamètre extérieur de l'autre, de sorte qu'il y ait frottement entre eux et étouffement des vibrations). [Sov04]

Des soupapes de sûreté afin de protéger la turbine contre les suppressions éventuelles.

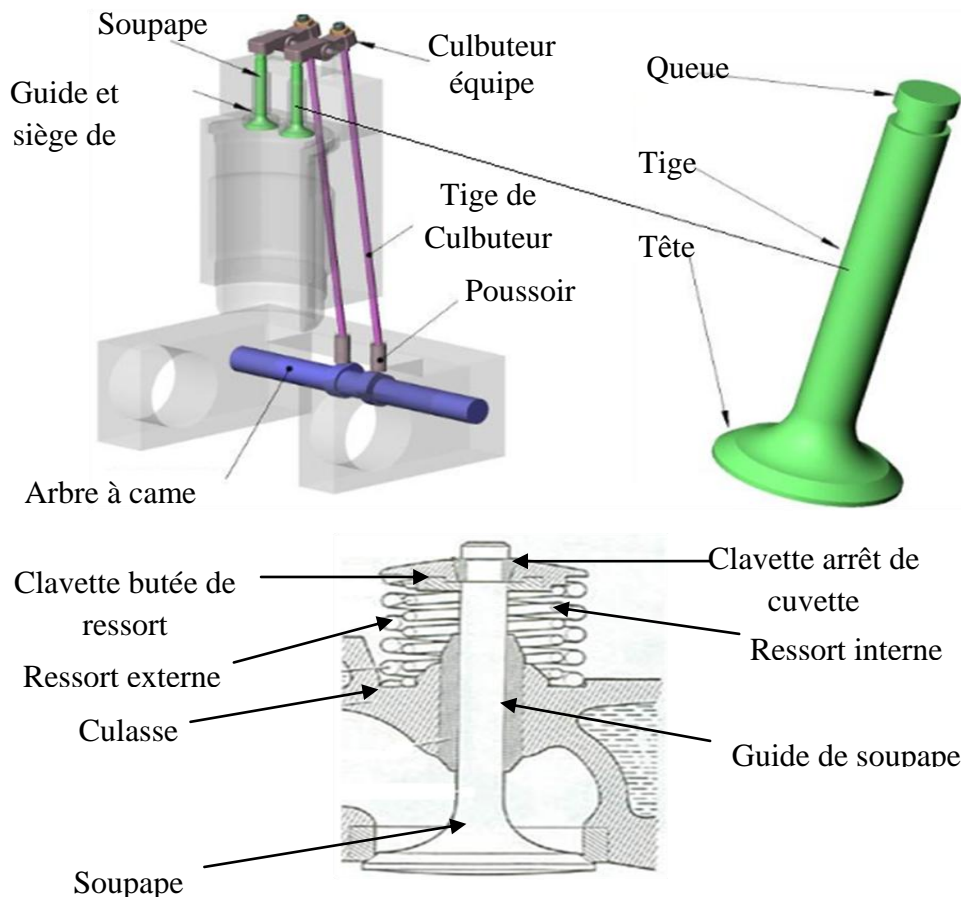


Figure II.6 : Montage d'une soupape à tige et avec deux ressorts

concentriques [Obe08, Sov04]

2.1.3. Principe de fonctionnement de TAV

Une turbine à vapeur transforme l'énergie de la vapeur en puissance à l'arbre soit par impact, soit par le passage de la vapeur sur les aubes fixées à l'arbre. Dans une turbine à action (figure II. 7.a), la vapeur se détend dans les tuyères, ce qui a pour effet de réduire la pression et augmente la vitesse d'écoulement.

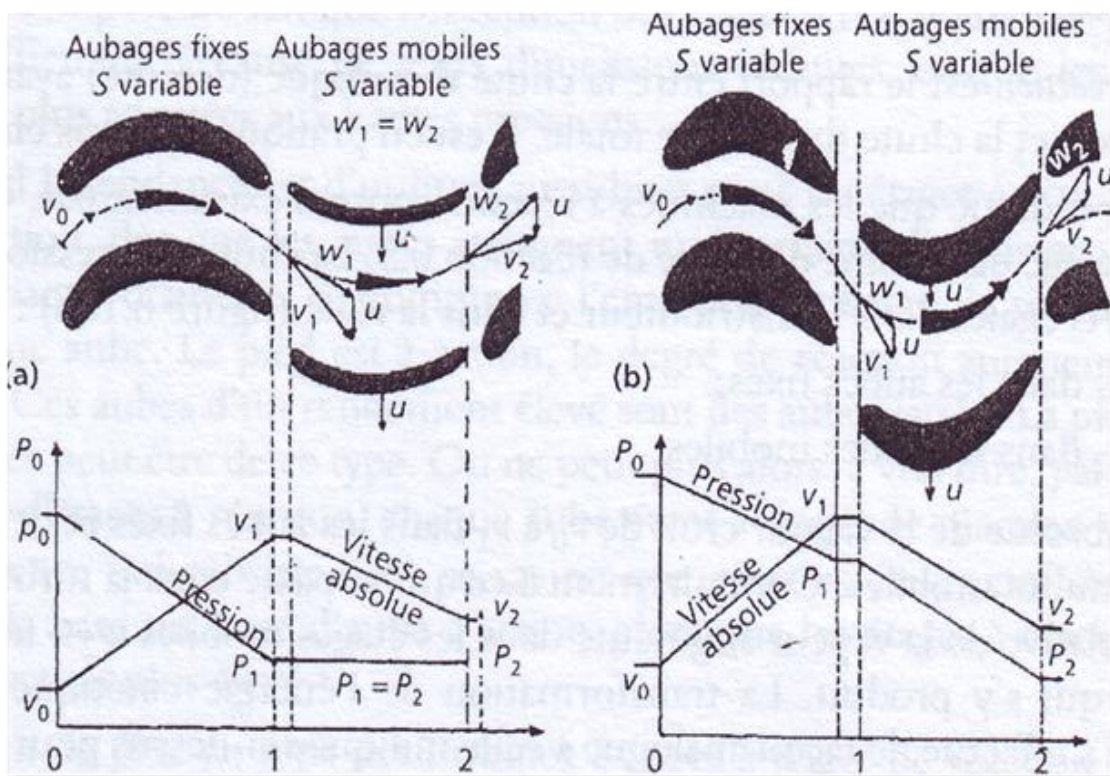


Figure II.7 : Géométrie des aubages, triangles des vitesses des turbines à action [Mic05]

Les profils de pression et de vitesse (figure II.7) représentent les variations à l'intérieur de la turbine. La vapeur haute vitesse est acheminée à travers la première rangée d'aubes mobiles. Celles-ci absorbent une partie de la vapeur et font tourner l'arbre. La vapeur traverse ensuite une rangée d'aubes fixes qui la redirige vers une deuxième rangée d'aubes mobiles où la vitesse de la vapeur est réduite de nouveau pour exploiter au mieux l'énergie. L'effet cumulatif des forces réactionnelles sur les aubes mobiles assure la puissance rotative communiquée à l'arbre. Une turbine multi-étagée peut comporter plusieurs rangées d'aubes fixes et mobiles tandis qu'une turbine à un seul étage ne comprend que des aubes mobiles pour assurer la puissance de l'arbre [Rob08]

2.3. Écoulement à travers les aubes

Tout écoulement de fluide passant entre des aubes est matérialisé par un triangle des vitesses. Ainsi, un écoulement de la vapeur à la vitesse absolue v qui rencontre une roue de turbine dont la vitesse périphérique est u pénètre entre les aubes de cette roue avec la vitesse w [Mic99]. Ces trois vecteurs se combinent de la façon suivante : en tout point, la vitesse absolue de la vapeur est la somme géométrique de sa vitesse relative et de la vitesse circulaire des aubes mobile (figure II.8). [Emi05]

$$v = w + u \quad (\text{II.1})$$

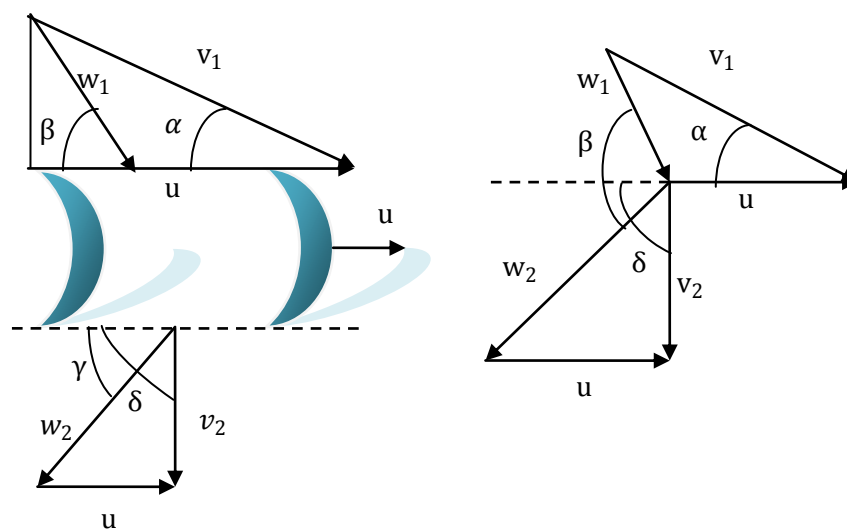


Figure II.8 : Représentation vectorielle des vitesses par rapport aux aubes

3. Modélisation de la chaudière

Le système de régulation de la chaudière est divisé en plusieurs sous systèmes. Le sous système d'alimentation en eau est utilisé pour réguler le niveau d'eau dans la chaudière ; le sous système de régulation de température est utilisé pour contrôler la température de la vapeur ; le sous système de régulation d'air est utilisé pour réguler l'excès de l'oxygène. Puisque la liaison entre le niveau de la chaudière, la température de la vapeur et l'excès de l'oxygène n'est pas forte, ces trois sous systèmes peuvent être conçus indépendamment. Donc l'unité chaudière-turbine peut être modélisée sous un système 2x2 [Wen03]. Deux entrées qui sont : débit de gaz et la position de la vanne de régulation. Les deux sorties sont : le débit de vapeur et la pression de commande. En supposant que le débit d'air est bien régulé.

Pour étudier le réglage du régulateur d'un ensemble chaudière-turbine, il est utile de trouver un modèle simple qui peut résumer la dynamique essentielle, surtout l'effet reliant l'électricité

produite avec la pression de commande. Mais, le comportement complet de l'ensemble chaudière-turbine est très compliqué et difficile à modéliser. Les auteurs [Maf97], [Che90] et [Mel91] ont proposé un système dynamique non linéaire avec une structure simple pour saisir la dynamique essentielle d'un ensemble chaudière-turbine (figure II.9).

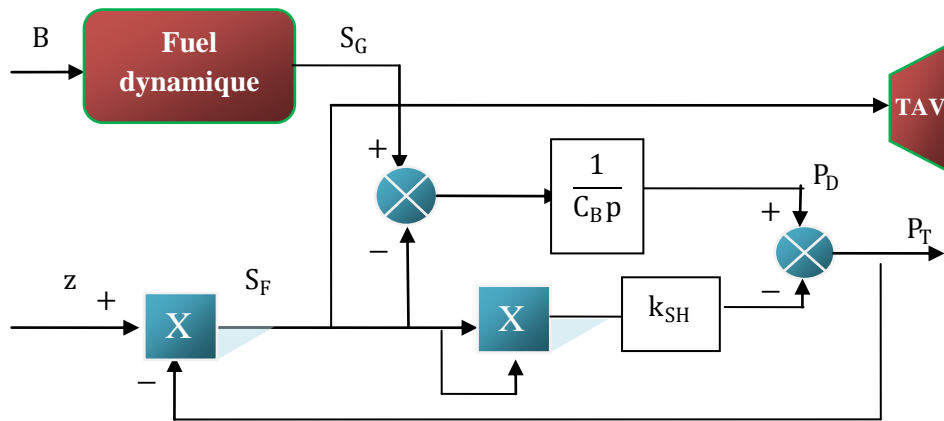


Figure II.9: Schéma fonctionnel de la chaudière

Le model dans la figure (II.9) montre la relation entre la conservation d'énergie et les caractéristiques non linéaires essentielles d'un système chaudière-turbine.

La relation de conservation d'énergie : la pression de la chaudière P_D donne la relation entre la vapeur générée S_G et le débit de vapeur dans la turbine S_F . [Wen03]

$$\Delta S_G - \Delta S_F = C_B \frac{d\Delta P_D}{dt} \tag{II. 2}$$

Les deux caractéristiques non linéaires sont : La chute de pression entre la pression de la chaudière P_D et la pression vapeur P_T qui est relié au débit de vapeur par : [Wen03]

$$P_D - P_T = K_{SH} S_F^2 \tag{II. 3}$$

Le débit de vapeur S_F est le produit de la pression de commande P_T et la position de la vanne régulatrice z : [Wen03]

$$S_F = z \cdot P_T \tag{II. 4}$$

Considérant le modèle linéaire d'un ensemble chaudière-turbine à un point de fonctionnement nominal et prenant les incréments des deux côtés des équations (2) et (3), on aura : [Wen03]

$$\begin{cases} \Delta P_D - \Delta P_T = R \cdot \Delta S_F \\ \Delta S_F = z \cdot \Delta P_T + P_T \Delta z \end{cases} \tag{II. 5}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta S_F \\ \Delta P_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathcal{T}_0 p + 1} & \frac{P_T \cdot C_B p}{z(\mathcal{T}_0 p + 1)} \\ \frac{1}{z(\mathcal{T}_0 p + 1)} & -\frac{P_T}{z} \cdot \frac{1}{(\mathcal{T}_0 p + 1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S_G \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (II. 6)$$

Avec :

$$\mathcal{T}_0 = (1 + zR)C_B, \quad T_b = C_B.R$$

Le système d'alimentation en gaz naturel est constitué d'une valve de gaz et d'un actionneur. Le débit de gaz est le résultat de l'inertie de l'actionneur et du positionneur de la valve. La fonction de transfert du positionneur de la valve est [Hai06]:

$$\Delta S_G = \frac{k_v}{\mathcal{T}_1 p + 1} \Delta B \quad (II. 7)$$

On remplace l'équation (II.6) dans l'équation (II.5) on aura :

$$\begin{bmatrix} \Delta S_F \\ \Delta P_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m_{11}}{(\mathcal{T}_0 p + 1) \cdot (\mathcal{T}_1 p + 1)} & \frac{m_{12} p}{(\mathcal{T}_0 p + 1)} \\ \frac{m_{21}}{(\mathcal{T}_0 p + 1) \cdot (\mathcal{T}_1 p + 1)} & -\frac{m_{22} \cdot (\mathcal{T}_b p + 1)}{(\mathcal{T}_0 p + 1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta B \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (II. 8)$$

Avec :

$$m_{11} = k_v, \quad m_{12} = \frac{P_T \cdot C_s}{z}, \quad m_{21} = \frac{1}{z}, \quad m_{22} = \frac{P_T}{z}$$

3.1. Système de régulation avec des contrôleurs PI

Considérons un système de rétroaction de la figure (II.10), où G est le modèle, G_d est la perturbation, et k est le contrôleur. Un système de contrôle doit répondre aux exigences suivantes : [Jin08]

- ♣ suivi de consigne ;
- ♣ atténuation de la perturbation ;
- ♣ une bonne performance.

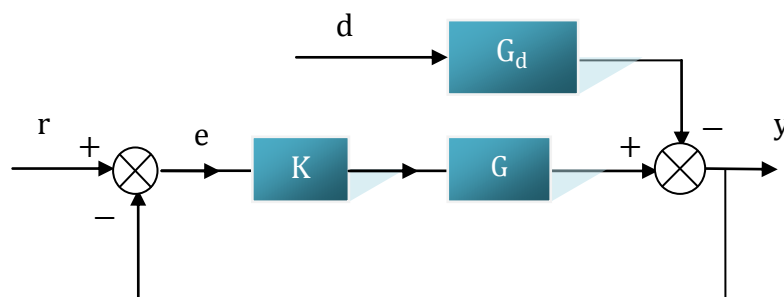


Figure II.10 : Digramme de régulation de la chaudière

Pour une installation à plusieurs variables, le suivi des consignes exige que le système soit découplé. Pour un système deux fois deux (2x2), supposons que le modèle et le contrôleur sont décomposés selon le système d'équation s (II.9). [Wen03]

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}, \quad k = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}, \quad (\text{II. 9})$$

Le système de découplage exige que le produit $G.k$, soit diagonal en boucle ouverte, à savoir :

$$\begin{cases} G_{11} \cdot k_{12} + G_{12} \cdot k_{22} = 0 \\ G_{21} \cdot k_{11} + G_{22} \cdot k_{21} = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 10})$$

On aura, ainsi un découplage complet pour un système 2x2 sous la forme suivante [Wen03]:

$$k = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}}{G_{11}} \\ -\frac{G_{21}}{G_{11}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11} & 0 \\ 0 & k_{22} \end{bmatrix}, \quad (\text{II. 11})$$

Après avoir déterminé l'équation du découpleur, nous allons l'appliquer sur le système d'équations (II.8)

$$k_d(p) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{m_{21}}{m_{11}} \cdot p \cdot (\mathcal{T}_1 p + 1) \\ \frac{m_{21}}{m_{11}} \cdot \left(\frac{1}{(\mathcal{T}_1 p + 1) \cdot (\mathcal{T}_0 p + 1)} \right) & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11} & 0 \\ 0 & k_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 12})$$

Le découpleur est d'ordre élevé et n'est pas facile à mettre en œuvre, certaines simplifications devrait être faites. Puisque les constantes de temps \mathcal{T}_0 et \mathcal{T}_1 sont supérieures à 10, l'effet dynamique de $(\mathcal{T}_1 p + 1) \cdot (\mathcal{T}_0 p + 1)$ peut être ignoré. Le second ordre action dérivée de $p \cdot (\mathcal{T}_1 p + 1)$ n'est pas réalisable de sorte que l'action de dérivée du premier ordre est conservée. Le régulateur final pour cette unité prend la forme du système d'équations (II.13). [Wen03]

$$k_d(p) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{m_{21}}{m_{11}} \cdot p \\ \frac{m_{21}}{m_{11}} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PI_1 & 0 \\ 0 & PI_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 13})$$

Où PI_1 et PI_2 sont deux contrôleurs PI à accorder pour atteindre les performances dynamiques souhaitées pour chaque boucle. La structure de contrôle est donnée sur la figure (II.11).

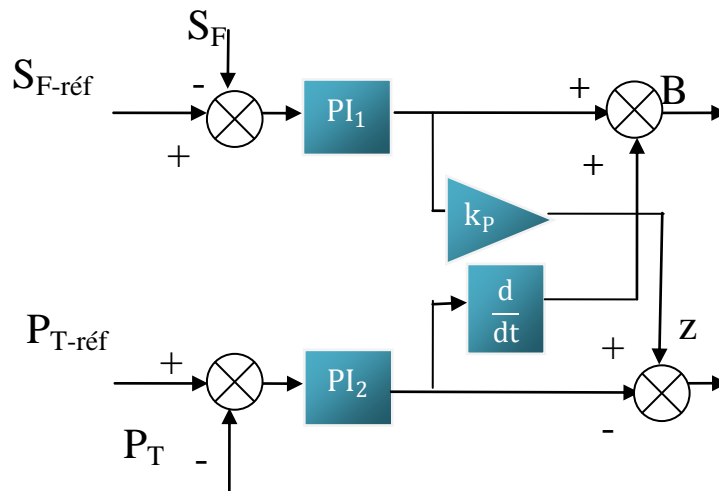


Figure II.11 : Système de régulation avec des régulateurs PI

3.2. Résultats de simulations avec contrôleurs PI et interprétations

Une simulation de la chaudière complète sous Matlab\ Simulink est effectuée, les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures (II.12, 13). Les paramètres de tout l'ensemble sont donnés en annexe A.

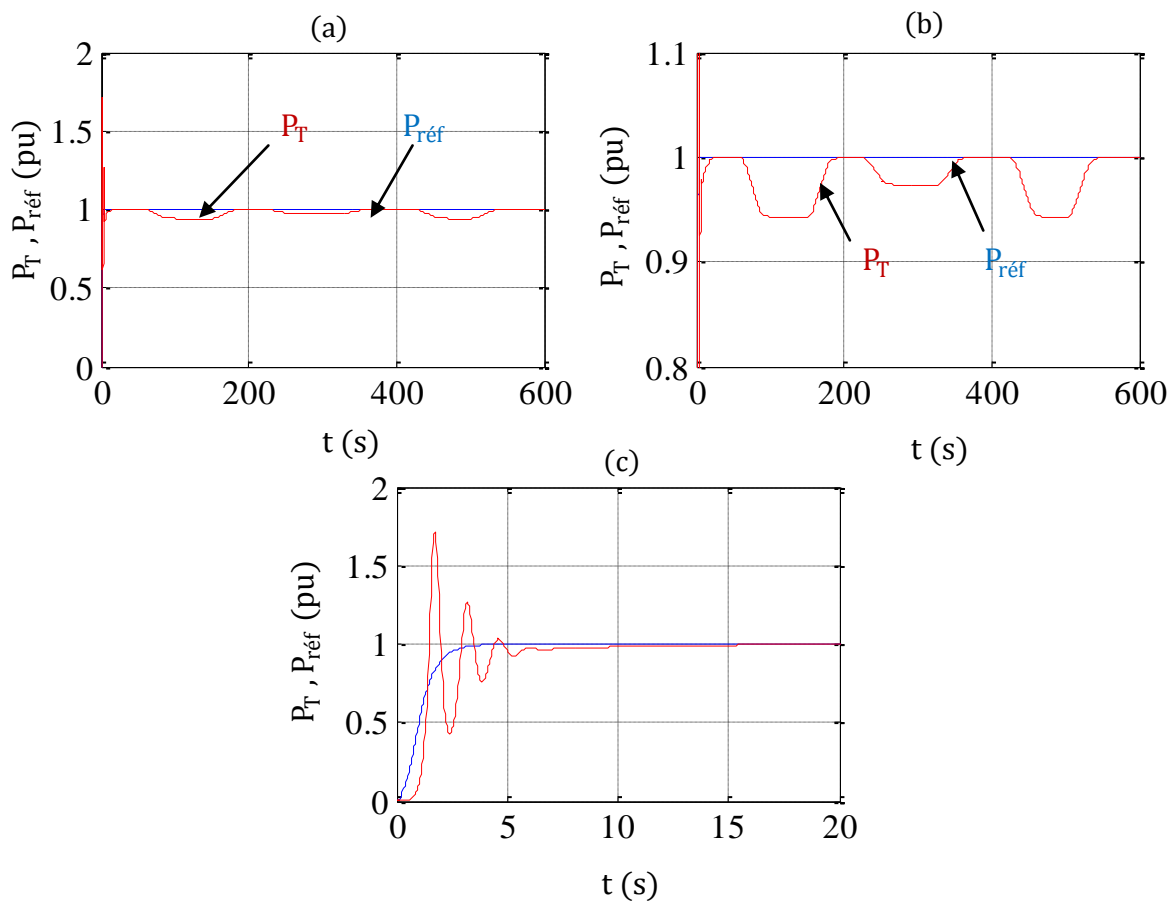


Figure II.12 : Pression de la vapeur d'eau

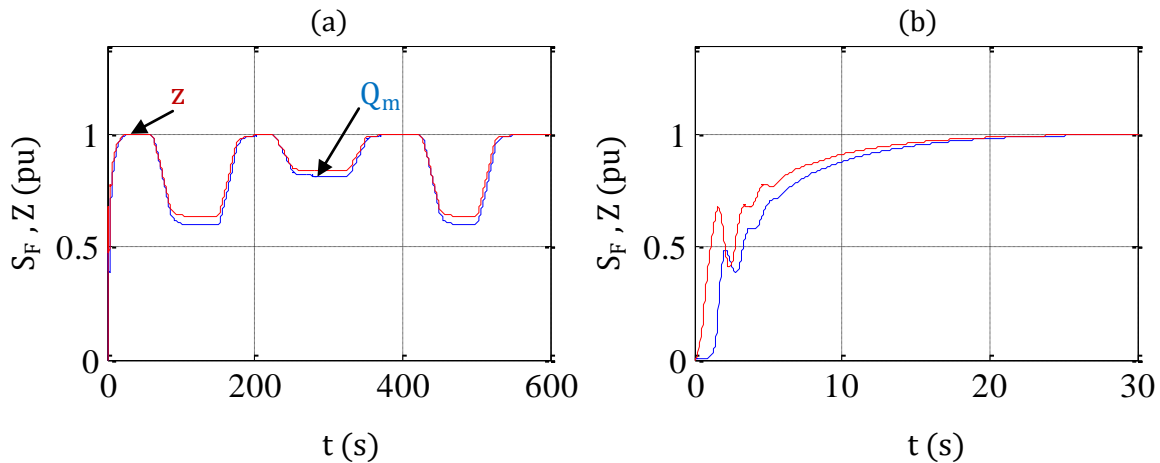


Figure II.13 : Section de passage et débit de la vapeur d'eau

D'après les résultats de simulation obtenus, on constate bien que la pression de la vapeur d'eau suit sa référence pour un débit de vapeur constant (égal à 1), mais pour un débit de vapeur produit variable la pression suit les variations de débit (figure II.12.a, b, c). L'allure de la section de passage z est identique à celle du débit de la vapeur pour les débits de vapeur égaux à 1 pu pour des valeurs inférieures on remarque un écart entre les deux courbes (figure II.13. a, b). L'effet du découplage des découpleurs obtenus ci-dessus ne sont pas assez satisfaisants. Une nouvelle structure de contrôle est décrite ci-dessous, le système est couplé uniquement dans le système l'équation (II.6), notez que l'inverse de ce système est :

$$C_s(p) = \begin{bmatrix} \mathcal{J}_b p & C_B p \\ \frac{1}{P_T} & -\frac{1}{P_T} \end{bmatrix} \quad (II.13)$$

On pose $k_v = k_1 k_2$, le nouveau système de découpleur est donné par (II.14).

$$W(p) = \begin{bmatrix} \frac{(\mathcal{J}_b p + 1)}{k_1 p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{p} \end{bmatrix} C_s(p) \begin{bmatrix} \frac{1}{k_2} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(\mathcal{J}_1 p + 1)(\mathcal{J}_b p + 1)}{k_1 k_2 p} & \frac{(\mathcal{J}_1 p + 1)C_B}{k_1} \\ \frac{1}{k_2 P_T p} & -\frac{z}{P_T p} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

Nous avons ajouté les intégrateurs, pour éliminer l'erreur dynamique, deux régulateurs en boucle unique, pour les éléments diagonaux, sont conçus pour améliorer les repenses dynamiques. Ils sont choisis comme régulateurs PD dans le but d'améliorer le comportement dynamique. Le système d'équations final est :

$$K(s) = \begin{bmatrix} \frac{(\mathcal{T}_1 p + 1)(\mathcal{T}_b p + 1)}{m_{11} s} & \frac{(\mathcal{T}_1 p + 1)m_{12}}{m_{11} m_{22}} \\ \frac{m_{21}}{m_{11} m_{22} p} & -\frac{1}{m_{22} p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PD_1 & 0 \\ 0 & PD_2 \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

Pour s'assurer que chaque élément du régulateur final peut être réalisé avec une structure PID (figure II.14), le polynôme du second ordre $(\mathcal{T}_1 p + 1)(\mathcal{T}_b p + 1)$ est réduit au premier ordre $(\mathcal{T}_b p + 1) + 1$, ce qui est possible tant que le produit $\mathcal{T}_1 \cdot \mathcal{T}_b$ est faible. En plus, les simulations ont montré que l'action dérivée est très sensible pour traiter les perturbations, donc un gain statique est utilisé à la place. La structure finale avec régulateur PID coordonné de l'ensemble chaudière-turbine est montrée sur la figure (II.14).

Le système d'équation final est donné par le système (II.16) :

$$K(s) = \begin{bmatrix} \frac{(T_1 p + 1)(T_b p + 1)}{m_{11} p} & \frac{m_{12}}{m_{11} m_{22}} \\ \frac{m_{21}}{m_{11} m_{22} p} & -\frac{1}{m_{22} p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PD_1 & 0 \\ 0 & PD_2 \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

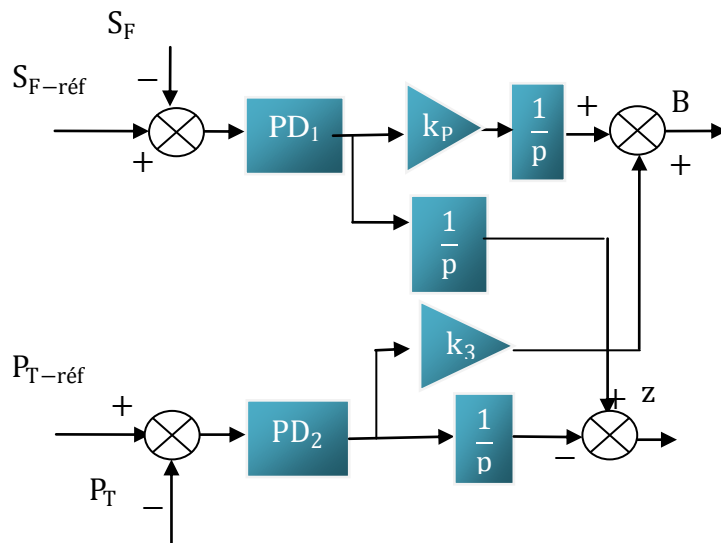


Figure II.14 : Système de régulation avec des régulateurs PID

3.3. Résultats de simulations avec contrôleurs PID et interprétations

Une simulation de la chaudière complète sous Matlab\ Simulink est effectuée, les résultats de simulation obtenus sont représentés sur la figure (II.15). Les paramètres de tout l'ensemble sont donnés en annexe C.

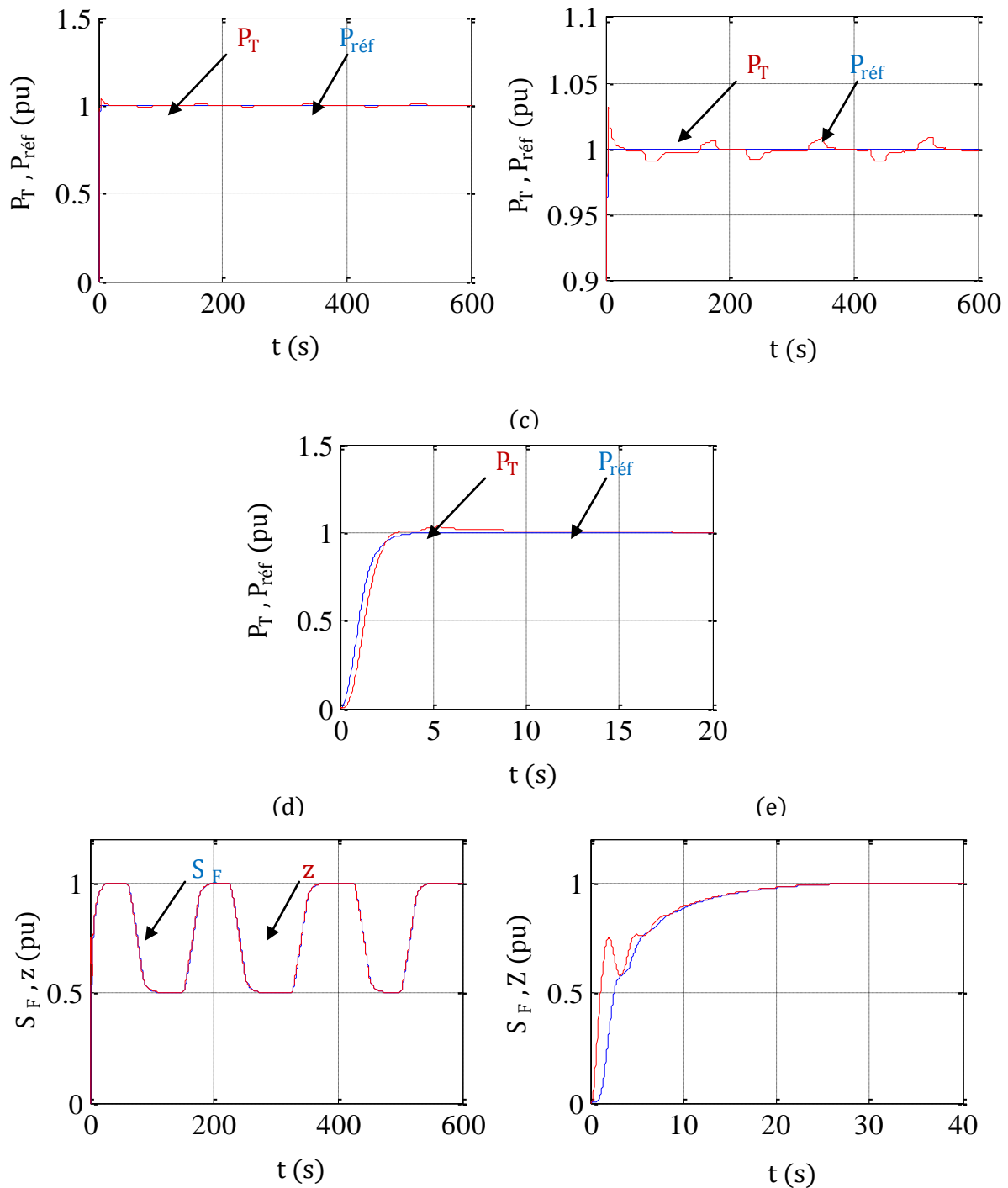


Figure II.15 : Pression, débit de vapeur et la section passage

On constate que la pression de la vapeur d'eau suit la pression de référence, avec des oscillations (figure II.15. a, b, c) presque nulles au régime transitoire. L'allure de la section de passage et la vapeur d'eau sont identiques, on remarque bien que la réponse est rapide comparée au résultat de la première simulation. Le contrôle par des régulateurs PID coordonnés a permis d'éliminer l'erreur dynamique (figure II.15.d, e) et d'améliorer les réponses dynamiques.

4. Interaction turbine – chaudière

Le mode de commande le plus naturel est celui où « la chaudière suit la turbine » (en anglais: « boiler flow mode »), comme symbolisé à la figure (II.16). Le régulateur de vitesse compare la vitesse de rotation à sa valeur nominale et corrige les écarts en ajustant la position z des soupapes de réglage. Il répercute de la même façon une variation de la consigne de production, entraînant un écart entre puissances actives demandée et produite.

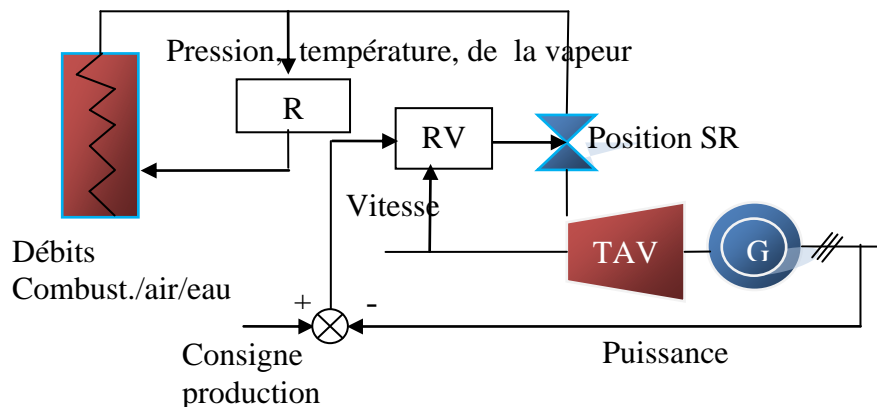


Figure II.16 : Régulation chaudière- turbine

5. Modélisation de la turbine à vapeur

5.1. Modèle complet d'une turbine

Dans l'établissement d'un schéma bloc de la turbine, l'usage est de traiter des grandeurs sans dimension, c'est-à-dire des valeurs en *per unit*. La normalisation est effectuée en divisant chaque grandeur par la valeur qu'elle a lorsque la puissance mécanique de la turbine est égale à sa valeur nominale P_N . La figure (II.17) donne le schéma bloc de la TAV modélisée (à cinq étages). [Tay06]

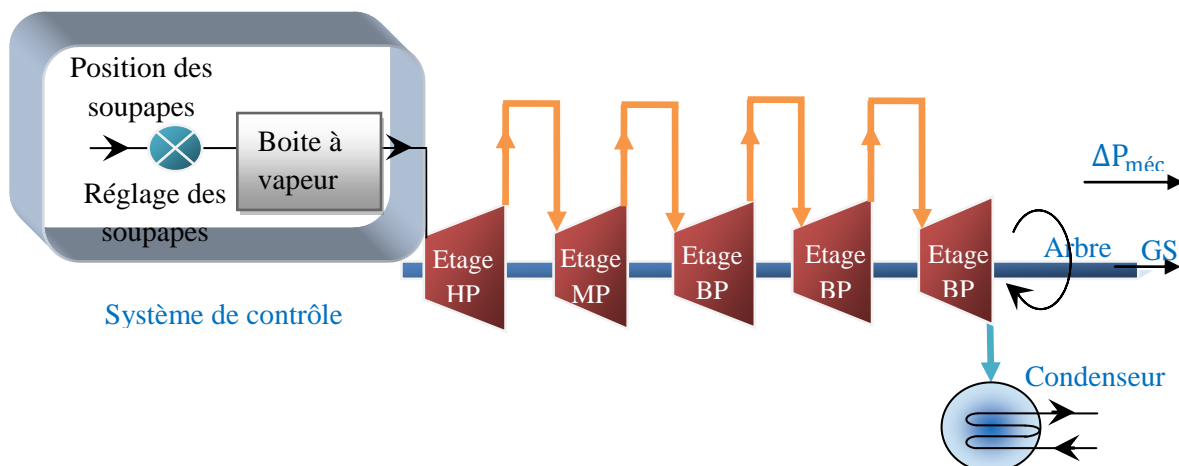


Figure II.17 : Diagramme schématisé de la turbine à cinq étages

On considère que la puissance mécanique développée par chaque étage de la turbine est proportionnelle au débit de vapeur à la sortie de cet étage. Par ailleurs, le débit de vapeur à l'entrée de l'étage HP de la turbine est proportionnel à la section de passage z de la vapeur dans les soupapes de réglage et à la pression de la vapeur P_T à la sortie de la chaudière.

Lorsque le débit de vapeur à l'entrée de l'étage HP change, le débit à la sortie, d_{HP} change avec une certaine constante de temps \mathcal{T}_{HP} . On obtient une telle fonction de transfert en exprimant que le débit à la sortie de l'étage est proportionnel à la pression qui règne dans celui-ci et que le taux de variation de cette pression est proportionnel à la différence entre les débits d'entrée et de sortie (figure II.18).

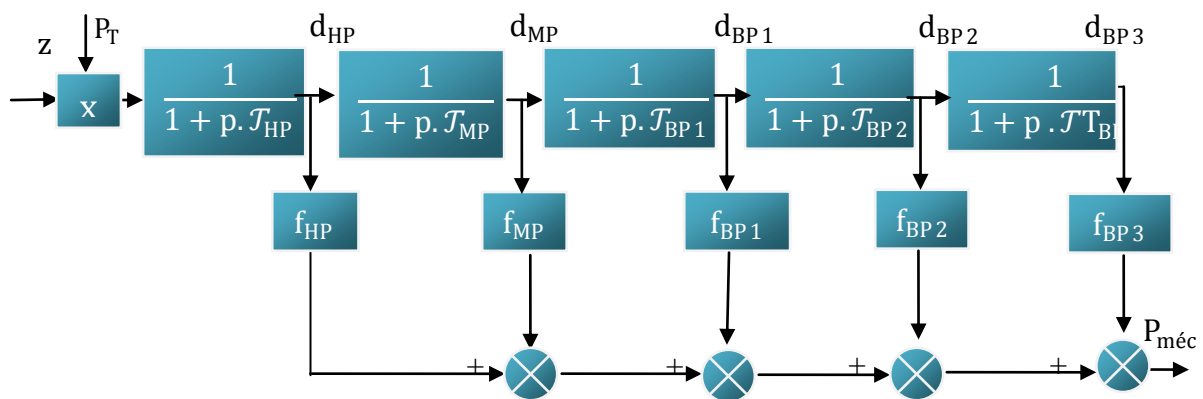


Figure II.18 : Schéma bloc simplifié de la turbine à vapeur

La réaction d'écoulement de la vapeur à la variation de la position des soupapes exhibe une constante de temps T_{HP} due au retard de chargement de la vapeur dans la boîte à vapeur et à son passage vers la section HP. Le passage de la vapeur d'un étage à un autre s'effectue avec un retard. Ce retard est exprimée par une constante de temps du deuxième étage jusqu'au dernier ($\mathcal{T}_{HP}, \mathcal{T}_{MP}, \mathcal{T}_{BP1}, \mathcal{T}_{BP2},$ et \mathcal{T}_{BP3}). Les constantes $f_{HP}, f_{MP}, f_{BP1}, f_{BP2}, f_{BP3}$ sont les fractions de la puissance totale générée par les sections HP, MP et BP respectivement; et Δz est la variation de la position des soupapes de régulateur de vitesse.

5.2. Principe de régulation de la turbine

Dans les centrales à TAV, deux fonctions essentielles doivent être assurées : maintenir la vitesse de la turbine constante malgré les fluctuations de la charge et de la pression de la vapeur d'admission, varier la vitesse de la turbine en fonction des exigences de la machine entraînée. [Ott03]

5.3. Description du schéma bloc

Un schéma de principe de la régulation de vitesse est donné à la figure (II.19). Un dispositif (MV) mesure la vitesse de rotation de l'ensemble (turbine-générateur). Dans le régulateur, cette mesure est comparée à la vitesse de rotation nominale (correspondant à une fréquence de 50 Hz) et l'écart entraîne une augmentation ou une diminution de l'admission de fluide dans la turbine, par action sur ses soupapes de réglage. Le régulateur de vitesse utilise un servovérin pour manœuvrer les soupapes. Ce dispositif comporte un piston, mû par de l'huile sous pression. Celle-ci est admise dans le cylindre, d'un côté ou de l'autre du piston selon le sens de la correction, par une vanne pilote. Le piston se déplace tant que la vanne pilote ne bloque pas l'admission d'huile, c'est-à-dire tant que le signal de correction qui commande la vanne pilote n'est pas revenu à zéro.

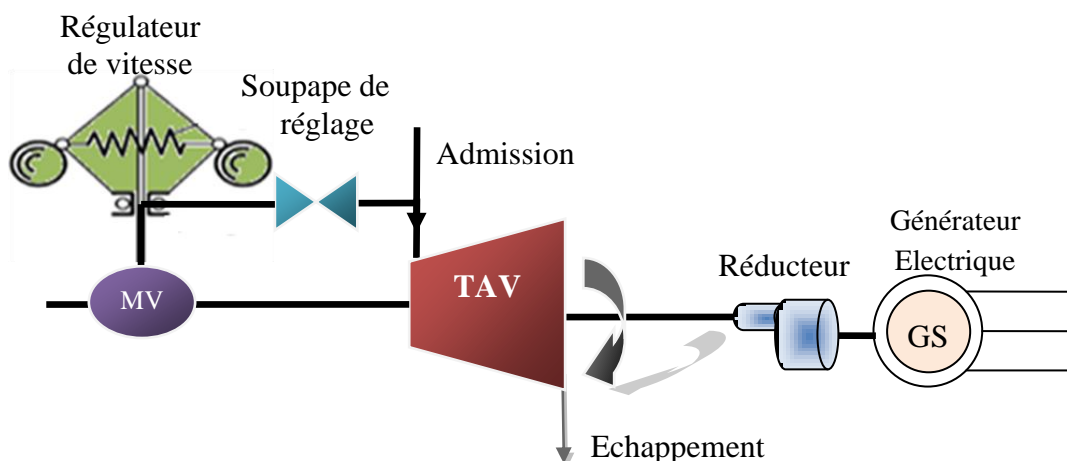


Figure II.19 : Schéma principal de la régulation du servomoteur

Le système de régulation est composé d'un régulateur de vitesse, une turbine et un servovérin qui actionne les soupapes d'admission de vapeur.

Le rôle du régulateur de vitesse (RV) est de mesurer la vitesse de rotation de la turbine et d'ajuster en conséquence l'admission de vapeur. Il sert également à ajuster le niveau de puissance selon la consigne reçue.

En fonctionnement normal, il modifie l'admission de vapeur dans la turbine en agissant seulement sur les soupapes de réglage; les autres vannes et soupapes sont entièrement ouvertes. Lors d'une perturbation sévère (conduisant à un déséquilibre entre couples électromagnétique et mécanique), la vitesse de la turbine peut augmenter rapidement, ce qui risque de la détériorer gravement. Le rôle du régulateur est alors d'empêcher que la vitesse atteigne plus de 110 % de sa valeur nominale, environ. Pour ce faire, le régulateur agit sur les

souppes de réglage lorsque la vitesse atteint environ 105 %, pour diminuer la fraction haute pression du couple.

5.4. Servovérin

Servovérin est un servoactionneur électrohydraulique destiné à l'asservissement en position d'une charge figure (II.20). Il regroupe sous forme compacte les éléments suivants :

- ♣ un vérin hydraulique double tige à sections symétriques,
- ♣ une servovalve électrodynamique, débit nominal : 75 l/mn ($\Delta P = 70$ bar), courant nominal : 50 mA,
- ♣ un électro-distributeur, de by-pass des chambres,
- ♣ un électro-distributeur d'alimentation.

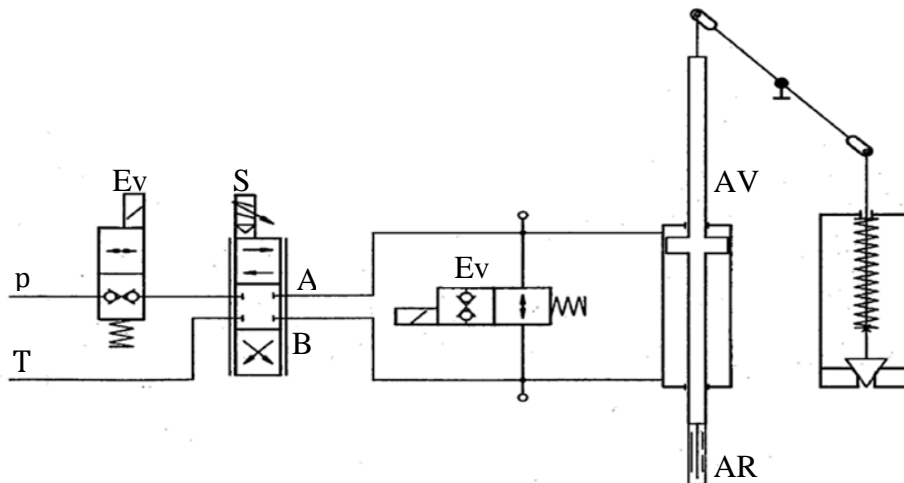


Figure II.20 : Schéma de commande du servovérin

5.5. Mode de fonctionnement

- ♣ Les bobines des électro-distributeurs EV1 et EV2 sont alimentées ;
- ♣ Les chambres du vérin sont isolées par électro-distributeurs EV2 ;
- ♣ L'excitation de la bobine de l'électro-distributeur EV1 autorise l'alimentation en pression de la servovalve ;
- ♣ En absence de courant de commande de la servovalve, le vérin est dans la position sortie de tige ;
- ♣ Un courant $-50\text{mA} \leq i \leq 5\text{mA}$ dans les bobines de la servovalve alimentées en série entraîne un déplacement du vérin dans le sens de la rentrée de tige ;
- ♣ La vitesse de déplacement est proportionnelle au courant de commande servovalve.

5.6. Servovalve

Les servovalves constituent le haut de gamme des distributeurs à action proportionnelle. Le déplacement du tiroir est commandé par l'étage buse-palette. La palette est solidaire à l'armature mobile d'un moteur-couple dont le déplacement est proportionnel au courant de commande. Le tiroir de distribution est asservi en position soit avec une contre-réaction électrique, soit avec une contre-réaction mécanique (la palette est reliée au tiroir par une tige flexible) soit avec une contre-réaction barométrique (différence de pression sur les faces du tiroir). Les servovalves sont caractérisées par leurs performances statiques (précision, hystérésis, etc.) et dynamiques élevées mais aussi par leurs coûts d'acquisition et de maintenance plus élevés. Elles sont toujours utilisées comme élément d'un système de commande en boucle fermée. [Moh06]

Le modèle de ces distributeurs est constitué par une partie statique non linéaire en série avec une partie dynamique linéaire (figure II.21).

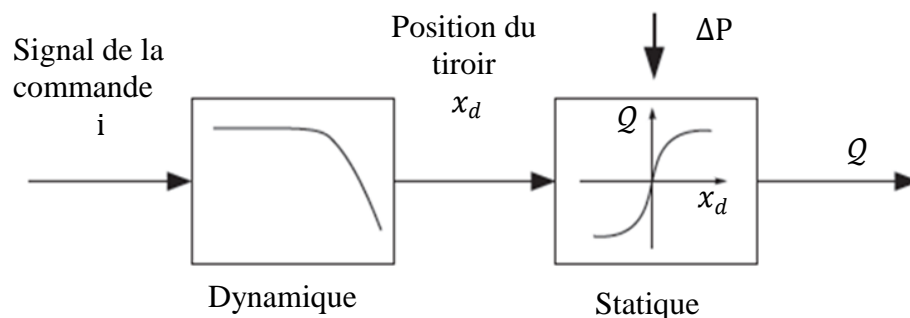


Figure II.21 : Schéma de principe d'un pré-actionneur hydraulique

La partie non linéaire représente la relation entre le débit volumique et le signal électrique ou la position du tiroir tandis que la partie linéaire est une approximation du comportement dynamique de l'ensemble. [Moh06]

5.7. Modèle dynamique de la servovalve (SDAP)

Le comportement dynamique de la servovalve est influencé dans une large mesure par la pression P , ainsi que par la valeur du signal d'entrée de commande. Le principe de la mesure est classique, la servovalve est excitée, en entrée, au moyen de signaux sinusoïdaux, la réponse du signal de sortie (position du tiroir) est saisie.

La fonction de transfert de la servovalve est donnée par l'équation suivante : [Jon07]

$$\frac{Q(p)}{i(p)} = \frac{k}{\frac{p^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta p}{\omega_n} + 1} \quad (\text{II. 17})$$

Avec : $\omega_n = 2\pi f$

5.8. Modélisation du vérin hydraulique

Un vérin hydraulique est un actionneur qui permet de transformer l'énergie hydraulique de l'huile en un travail mécanique. Il est soumis à des pressions d'huile qui permettent d'obtenir des mouvements. Il existe deux grandes familles de vérins, à savoir les vérins linéaires à simple effet et à double effet (Figure II.22 a et b) et les vérins rotatifs à crémaillère et à palettes (Figure II.22 c et d).

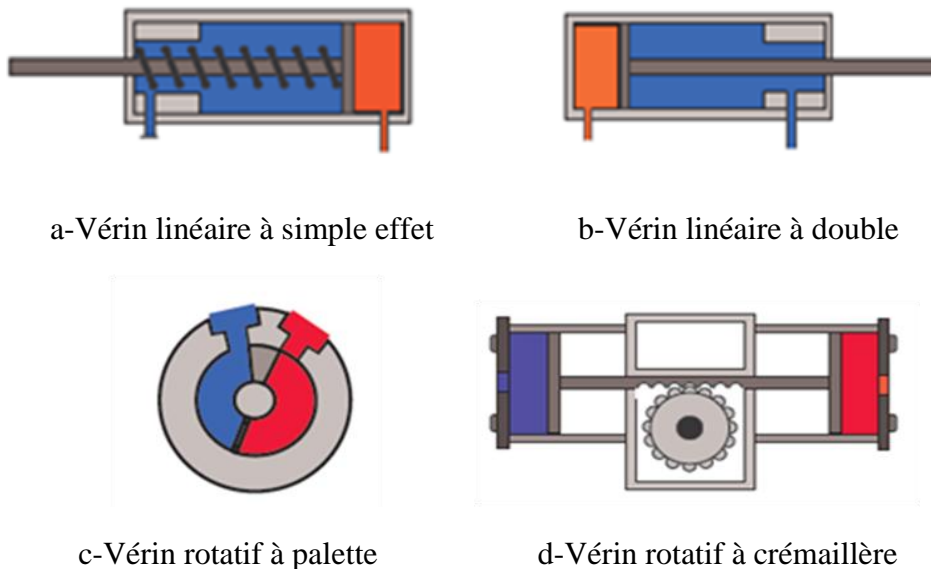


Figure II.22 : Vérins linéaires (a, b)- Vérins rotatifs (c, d)

Dans tout ce qui suit nous intéresserons uniquement aux vérins linéaires à double effet à sections symétriques.

5.9. Analyse technologique du vérin utilisé

Le vérin utilisé est un vérin double effet constitué de deux surfaces (S_v) opposées avec des superficies égales. Chaque chambre possède son propre orifice de raccordement (A) et (B) et l'étanchéité entre elles, est assurée par un joint torique. Si nous considérons la position centrale comme origine de la course ($y = 0$), le vérin possède une course utile $l_v = 100\text{mm}$ (figure II.23).

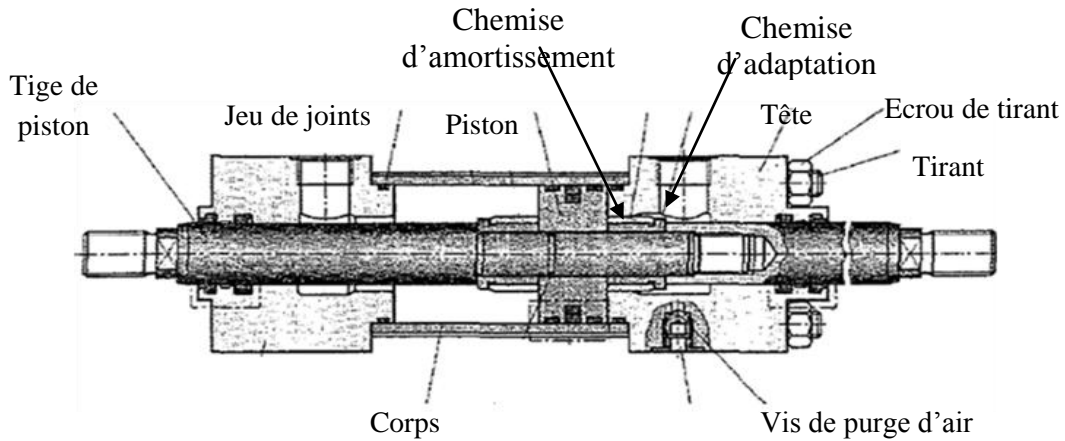


Figure II.23 : Vérin double effet, double tige

En général, la fonction de transfert du vérin est donnée par la formule suivante [Yin08]

$$x(p) = \frac{1}{\mathcal{J}_{cy} \cdot p} \tag{II. 8}$$

La fonction de transfert de l'ensemble(vérin et servovalve) est :

$$F_{Tv} = \left(\frac{1}{\mathcal{J}_{cy} \cdot p} \right) \left(\frac{k}{\frac{p^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta p}{\omega_n} + 1} \right) \tag{II. 19}$$

On associe à l'ensemble vérin et servovalve un correcteur (régulateur PI), dans le but de corriger la lecture de la température et de la pression. La figure (II.24) donne le schéma bloc de l'ensemble.

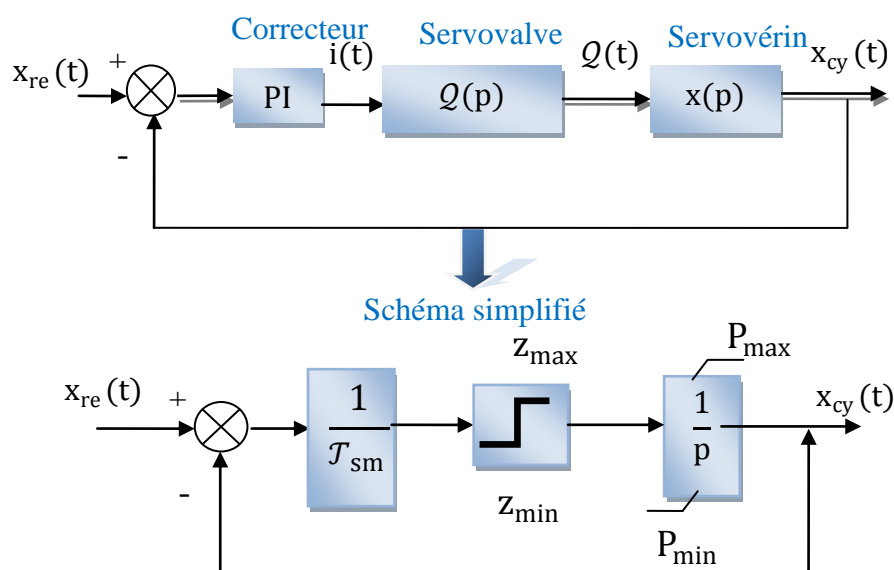


Figure II.24 : Schéma bloc du servovérin

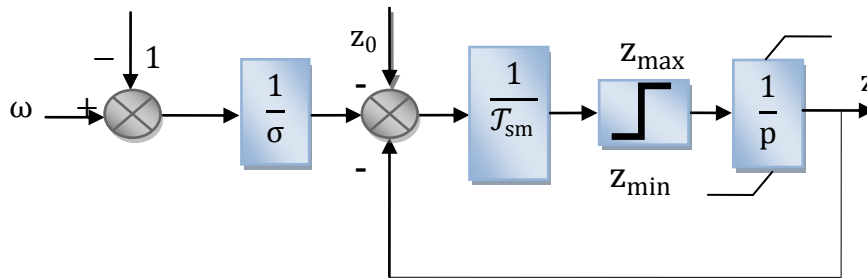


Figure II. 26 : Schéma Simplifié du bloc de régulation de vitesse avec statisme

La fonction de transfert de l'ensemble est :

$$z = \left(\frac{1}{1 + p \cdot T_{sm}} \right) \left(z_0 - \frac{\omega - 1}{\sigma} \right) = \frac{1}{1 + p \cdot T_{sm}} \left(z_0 - \frac{f - 1}{\sigma} \right) \tag{II. 22}$$

$$\sigma = \left| \frac{\Delta f / f_N}{\Delta P_m / P_N} \right| = \left| \frac{\Delta \omega / \omega_0}{\Delta P_m / P_N} \right| \tag{II. 23}$$

7. Résultats de simulation

Une simulation de l'ensemble (chaudière-turbine, servovérin et régulateur de vitesse) complète sous Matlab\ Simulink est effectuée pour un fonctionnement à vitesse, les résultats de simulation obtenus sont représentés sur (figures II.28) et (figure II.29) pour les deux modes de fonctionnement respectivement. Les paramètres de tout l'ensemble sont donnés en annexe C.

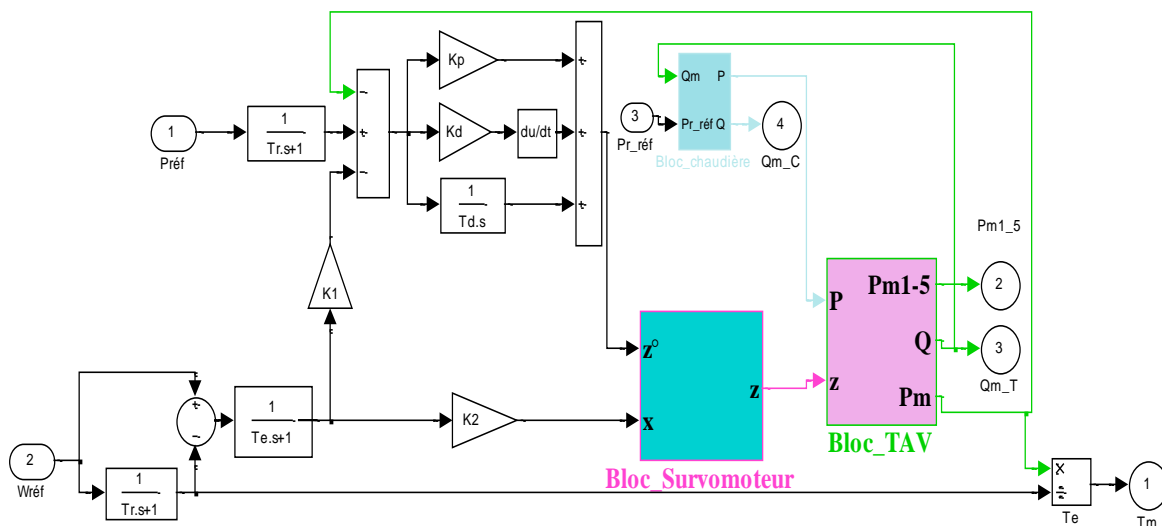


Figure II. 27 : Schéma de simulation de l'ensemble chaudière-TAV

D'après les résultats de simulation obtenus, on constate bien que le régulateur de vitesse maintient la vitesse de rotation de la turbine autour de sa référence, même si la demande de la

charge variée (figure II.28 a), le servovérin hydraulique agit dans le sens d'évaluation de la charge (figure II.29), où z_0 est régulée en fonction de la consigne de puissance, puissance mécanique délivrée par la turbine et la vitesse de rotation (figure II.28.c). Les profils de la puissance mécanique, le débit de vapeur et la section de passage de la vapeur d'eau (z) sont identiques (figure II.29). Les puissances mécaniques délivrées par chaque étage suivent les variations de la charge. La puissance mécanique totale est égale à la somme des puissances de chaque étage (figure II.28).

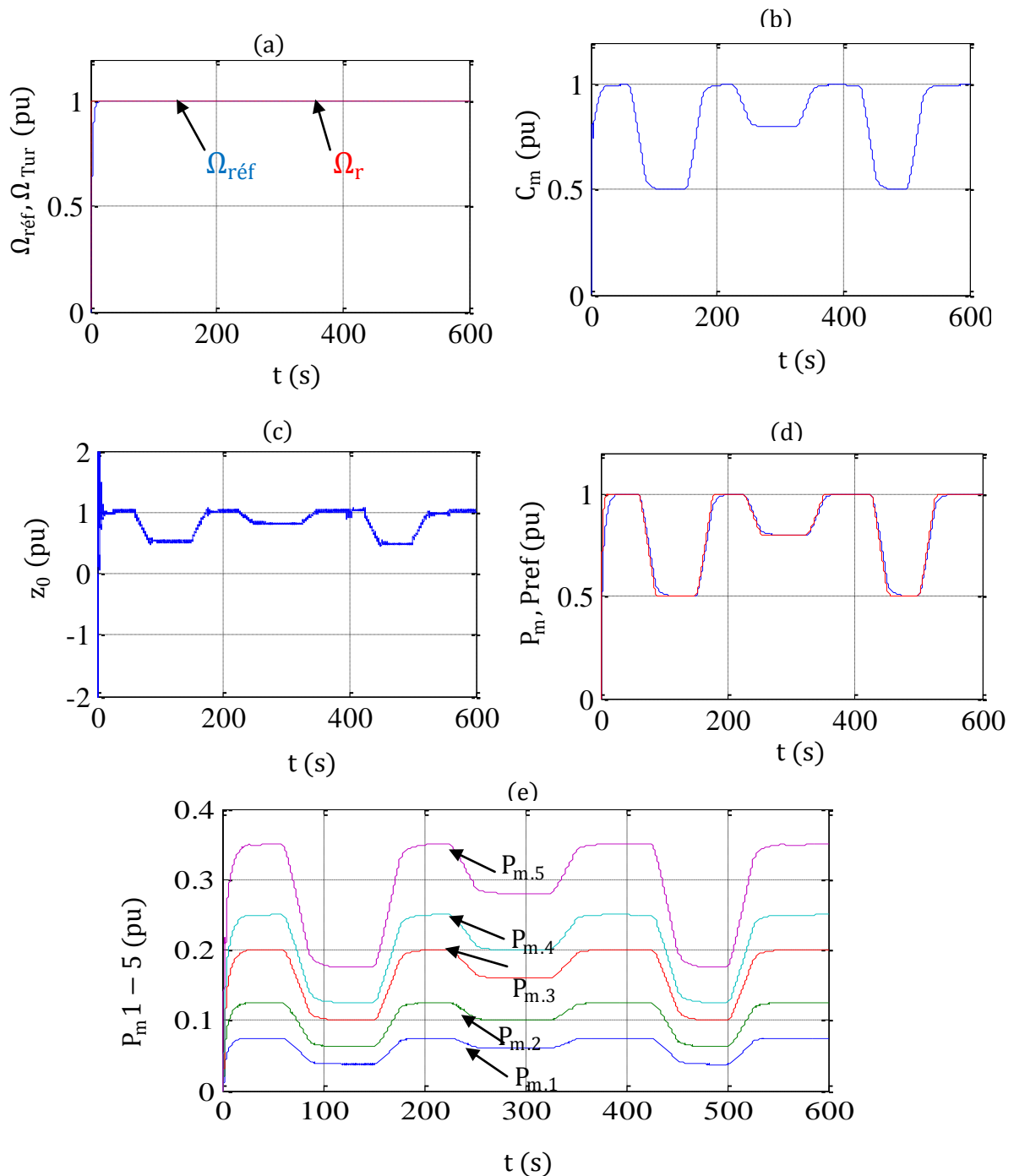


Figure II.28 : Vitesse, couple, puissance de la TAV

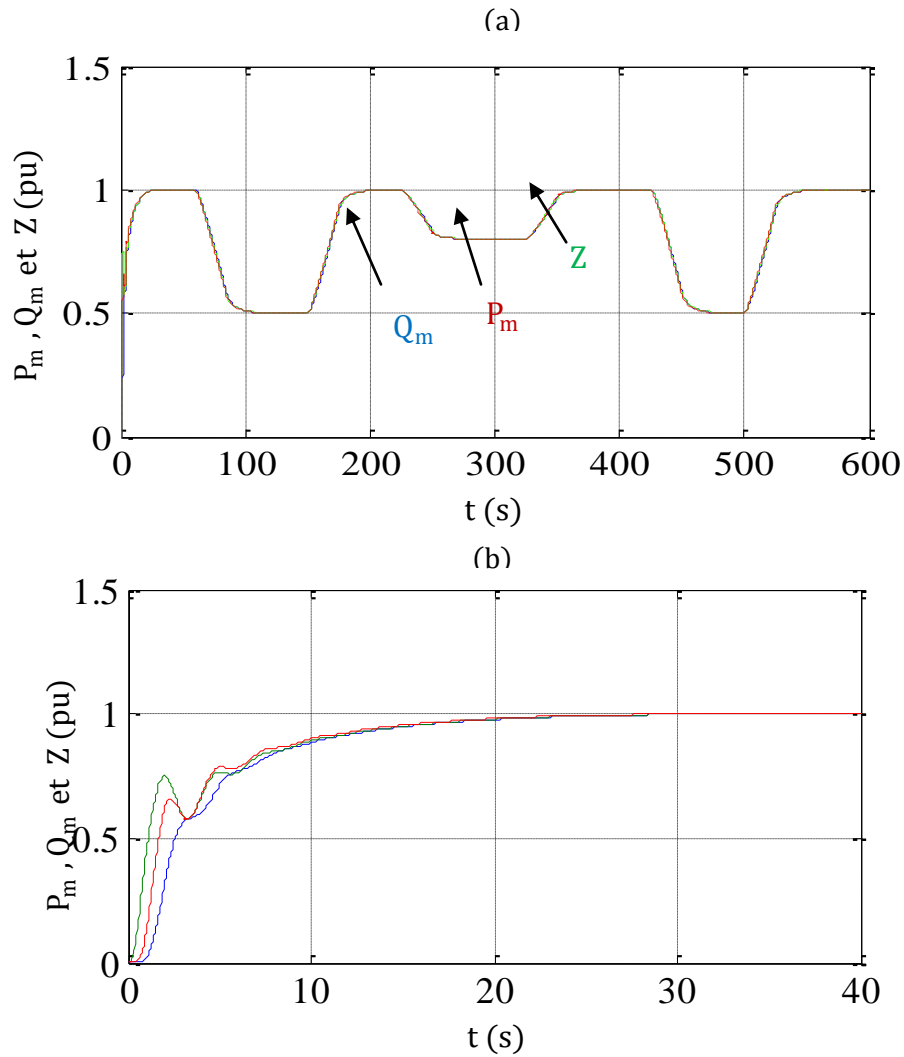


Figure II.29 : Puissances, section de passage et débit de vapeur

Les résultats de simulation pour le fonctionnement à vitesse variable sont représentés sur les figures (II.30, 31 et 32).

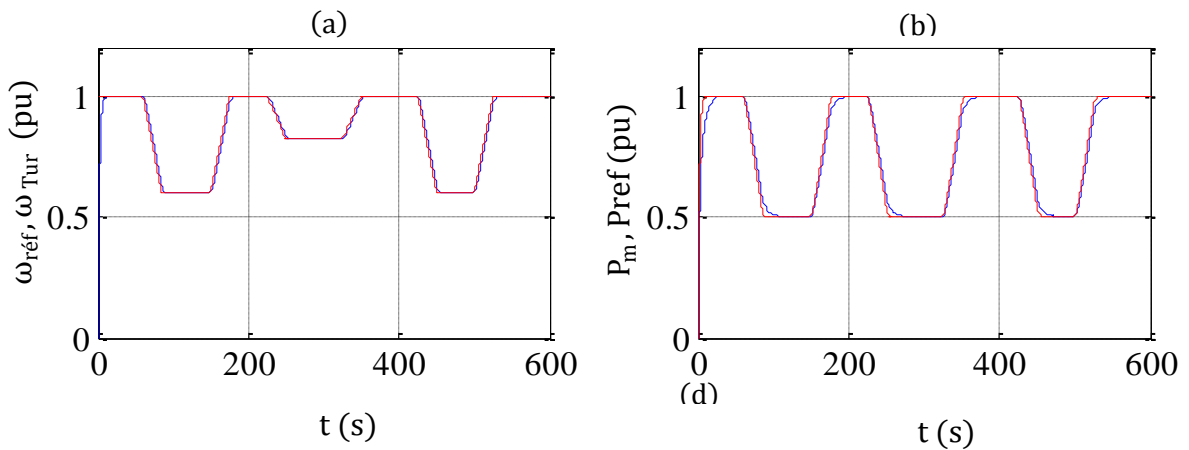


Figure II.30 : Vitesse et puissance

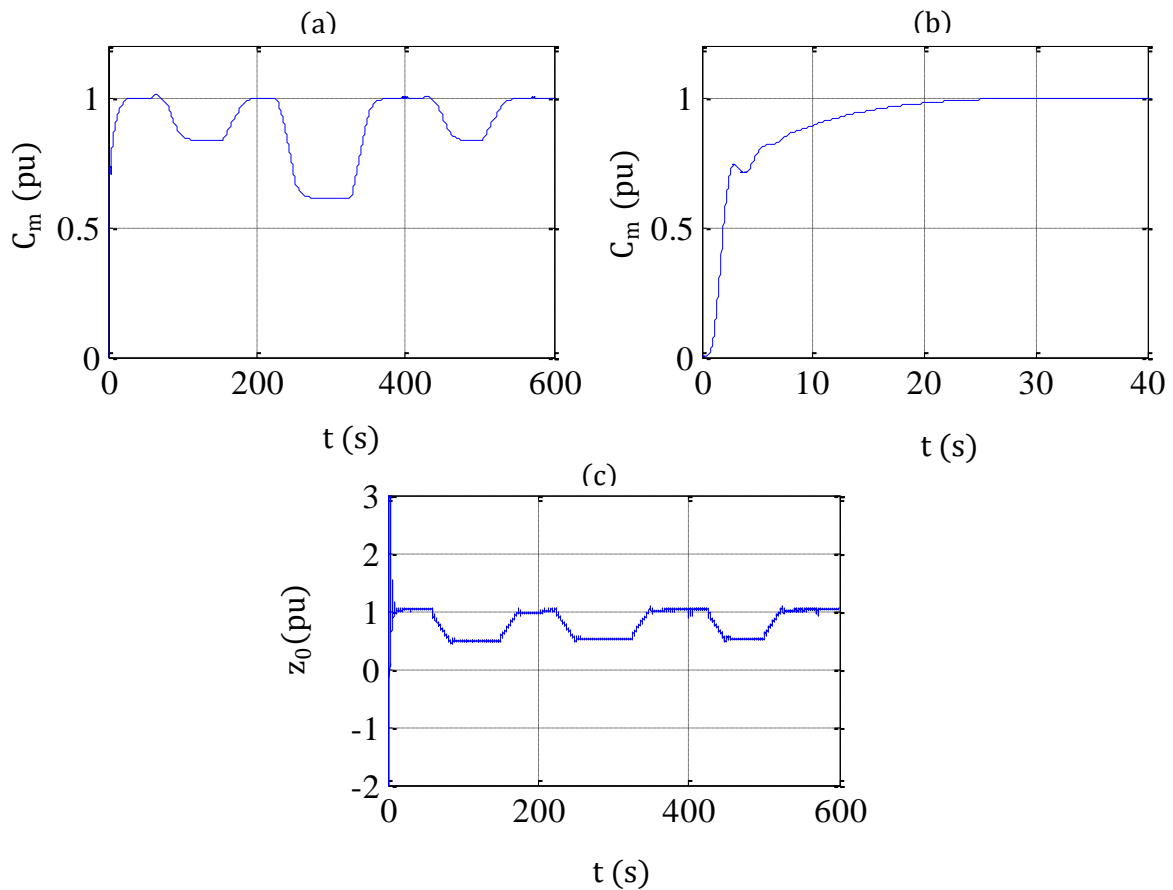


Figure II.31 : Couple, section de passage de la vapeur d'eau

Pour le fonctionnement à vitesse variable, le régulateur de vitesse agit dans le sens d'évolution de la charge et atteint automatiquement les soupapes de réglages à travers le servovérin. Le couple mécanique délivré par la TAV, suit les variations de la vitesse et la puissance mécanique. On constate aussi que z_0 (figure II.31.c) suit le profil de la puissance imposée, les puissances mécaniques délivrées par chaque étages suivent les variations de la charge. La puissance mécanique totale est égale à la somme des puissances de chaque étages (figure II.32.a, b ; figure II 33.a, b).

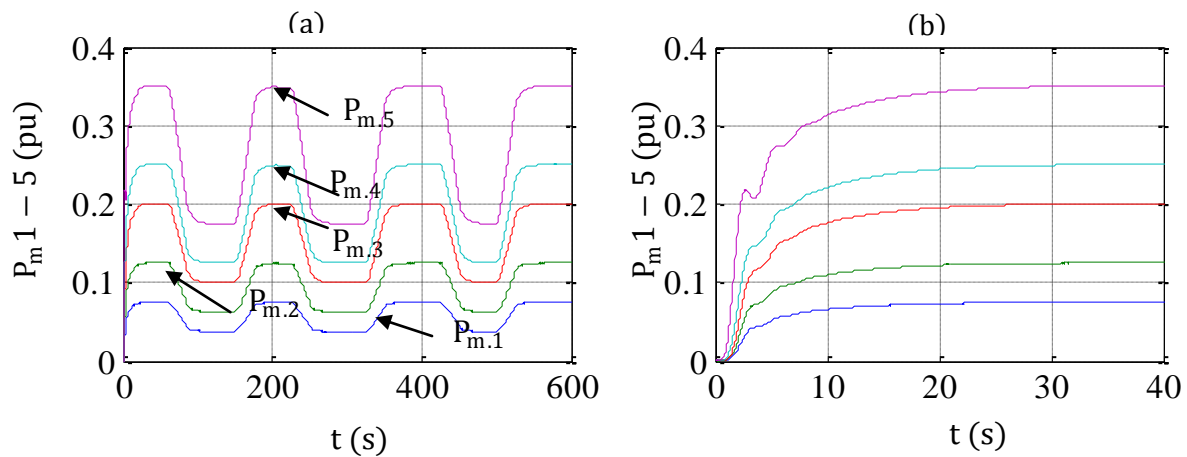


Figure II.32 : Puissances, section de passage et débit de vapeur

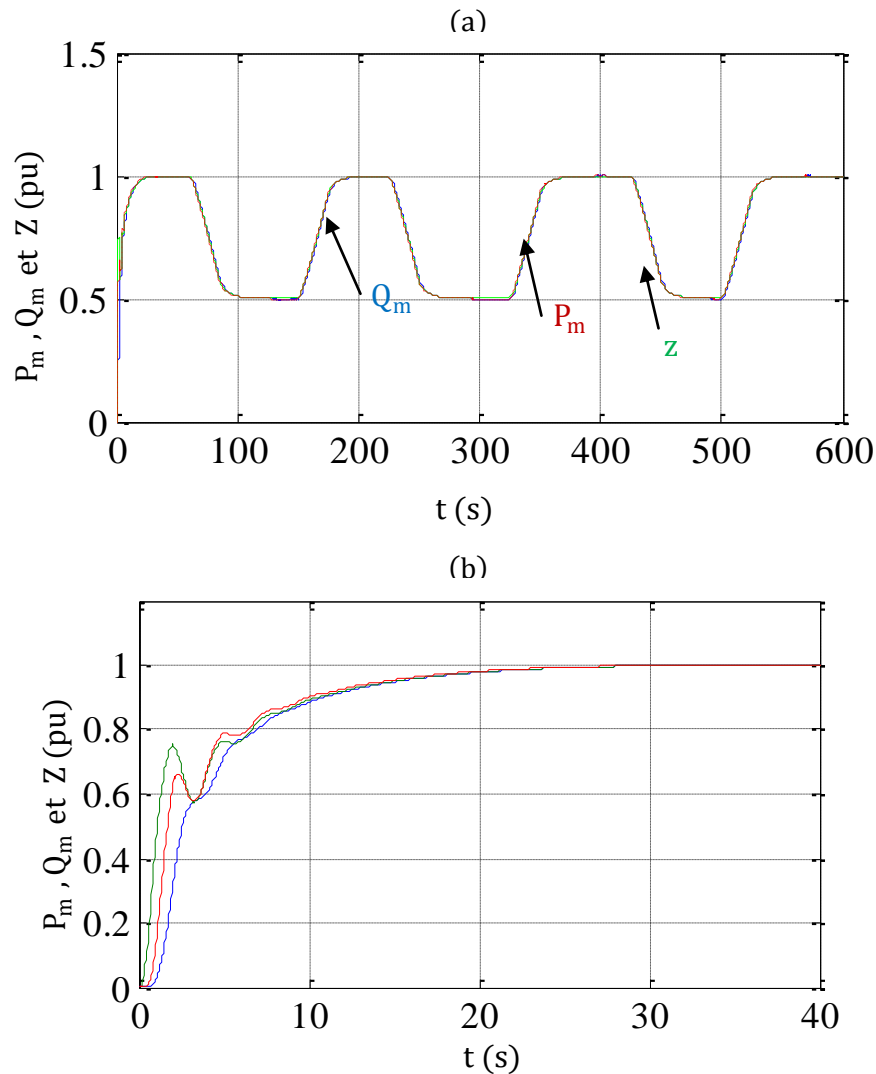


Figure II.33 : Puissances, section de passage et débit de vapeur

Conclusion

Ce deuxième chapitre est consacré à l'étude et la modélisation de l'ensemble chaudière-turbine et la régulation de pression, débit de vapeur, la vitesse et le contrôle en puissance. Dans la première partie nous avons décrit le principe de fonctionnement de l'ensemble modélisé, système de commande du servovérin et du régulateur de vitesse. Dans la seconde partie on s'est intéressé à la simulation de l'ensemble et au comportement du régulateur vis-à-vis des références imposées.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude et à la simulation numérique d'une chaîne de conversion d'énergie basée sur une TAV couplée à un générateur synchrone.

ÉTUDE DE LA CHAÎNE DE CONVERSION D'ÉNERGIE CONNECTÉE AU RESEAU

Introduction

Ce chapitre est dédié à l'étude d'une chaîne de production et de conversion d'énergie basée sur une TAV couplée à un générateur synchrone à trois étages (GS3E) avec un réducteur de vitesse. Chaque élément de la chaîne de conversion est modélisé en vue d'une simulation globale du système de production raccordé au réseau électrique de distribution. La première partie est consacrée à l'étude et la simulation de la chaîne de conversion pour une connexion directe au réseau électrique à excitation variable, la deuxième partie est consacrée à une chaîne de conversion pour une connexion indirecte au réseau avec un fonctionnement à vitesse variable. Les résultats de simulation et les interprétations sont donnés à la fin du chapitre.

1. Description de la chaîne de production

Comme le montre la figure (III.1), le système est composé d'une unité chaudière-turbine, d'une machine synchrone à trois étages, machine synchrone inverse (MSI), machine synchrone à aimants permanents (MSAP) et des convertisseurs statiques.

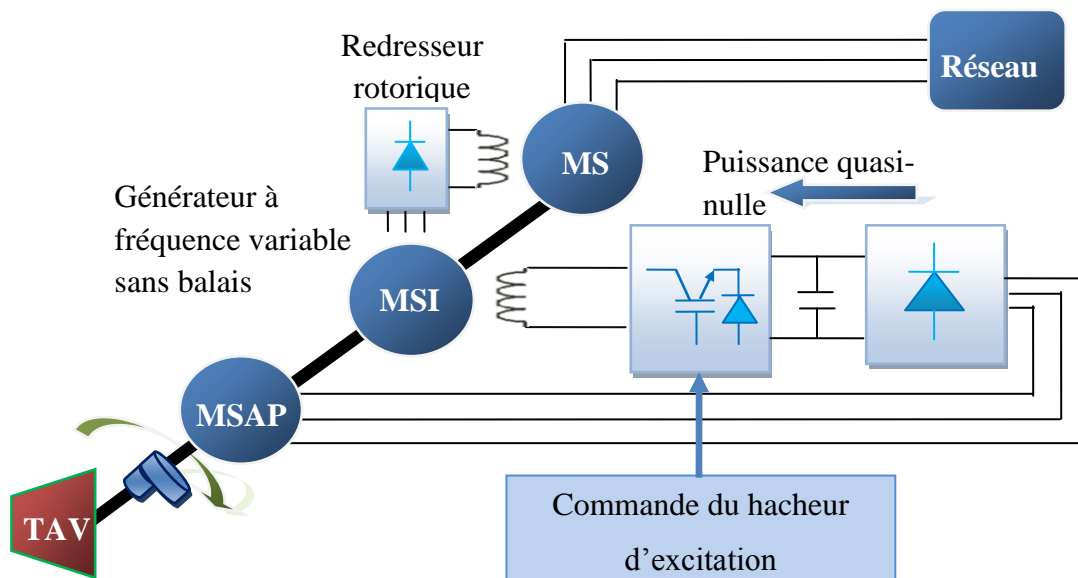


Figure III.1 : Schéma du système étudié à excitation variable

La turbine d'une puissance de 26 MW est contrôlée pour le fonctionnement à vitesse variable et constante, le contrôle de la puissance mécanique délivrée par la turbine est régulée en fonction de la variation de la charge et la vitesse de rotation.

La machine synchrone à trois étages d'une puissance de 25,1MW, à nombre de pôles faible ($2p = 4$) permet un fonctionnement à grandes vitesses de rotation. Le système d'excitation est composée d'une machine synchrone inverse (MSI) et une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) à 12 paires de pôle chacune, la première a une puissance de 3765kw et la deuxième de 565kW. Le réducteur de vitesse utilisé est de type simple train parallèle à denture hélicoïdale.

1.1. Réseau alternatif à fréquence fixe

Les possibilités de génération d'énergie sous forme de courants alternatifs (réseau triphasé) peuvent raisonnablement se classer en deux catégories :

- ♣ Génération à travers un convertisseur statique figure (III.2),
- ♣ Génération obtenue directement par une machine électrique.

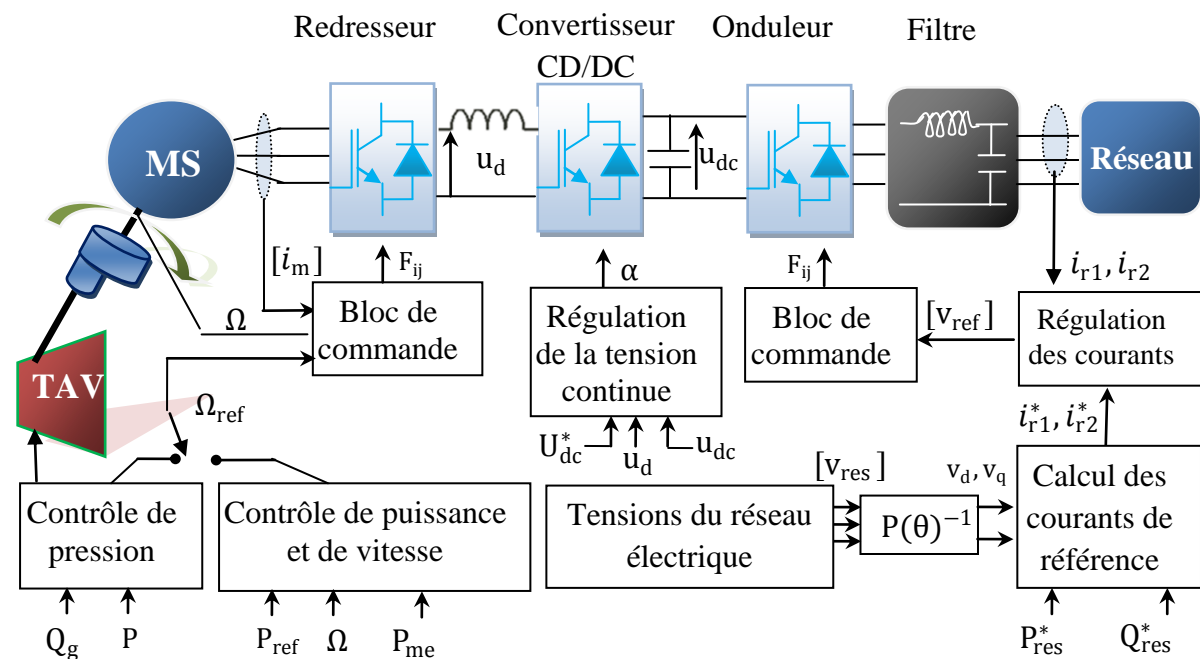


Figure III.2 : Schéma du système étudié et de sa stratégie de commande

Dans le premier cas, on peut déterminer une architecture en partant du réseau pour remonter à la source d'énergie électrique (machine tournante). Le premier élément rencontré est a priori un onduleur de tension triphasé connecté au réseau à alimenter au travers d'un filtre LC (triphasé). Ce convertisseur devant nécessairement être alimenté par l'intermédiaire d'un bus continu et tous les générateurs utilisables étant des machines à courant alternatif, on peut conclure que l'élément amont est nécessairement un redresseur, commandé ou non : ce paramètre étant lié au choix de la machine utilisée comme générateur.

Dans le cas d'une génération directe par une machine, pour la construction d'une architecture de générateur sans balais, seule la machine asynchrone à double alimentation permet d'obtenir un fonctionnement de ce type pour une vitesse d'entraînement variable (figure III.3). [Nic08]

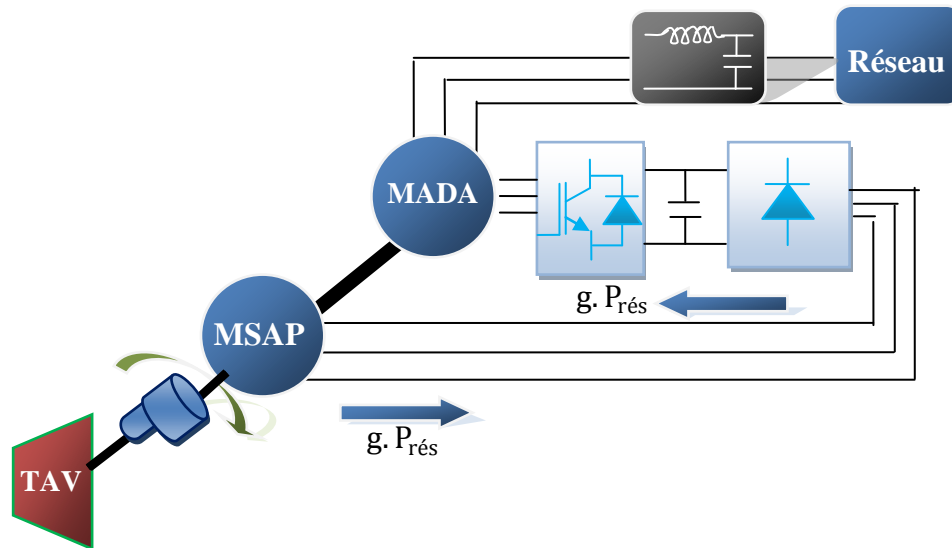


Figure III.3 : Architecture de générateurs à fréquence fixe et à vitesse variable

1.2. Réseau alternatif à fréquence Variable

Le réseau alternatif à fréquence variable pose moins de problèmes dans la mesure où l'utilisation d'une machine synchrone couplée directement au réseau est envisageable contrairement au cas précédent pour lequel l'utilisation de ce type de machine nécessite obligatoirement l'utilisation de deux convertisseurs statiques.

Le fonctionnement à vitesse variable autorise l'utilisation de machines synchrones. Néanmoins il est souhaitable de maintenir l'amplitude des tensions fournies au réseau constantes. Les deux solutions possibles sont [Nic08] :

- ♣ Génératrice synchrone à trois étages,
- ♣ Machine synchrone à double excitation (solution innovante pour utilisation automobile).

2. Description et modélisation du réducteur de vitesse

Dans la transmission du mouvement, pour éviter le glissement, nous utilisons des roues dentées. L'ensemble des deux roues dentées est nommé engrenage. Quand deux roues dentées sont en prise, la petite s'appelle le pignon et la grande conserve le nom de roue. Pour permettre un mouvement continu entre deux roues dentées on utilise des dentures hélicoïdales (figure III.4).

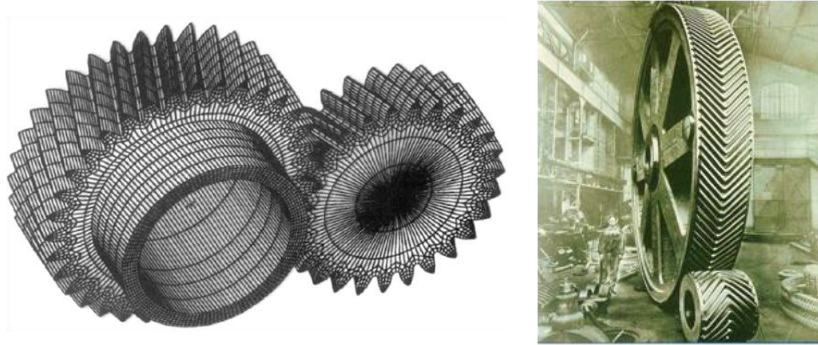


Figure III.4 : Roue et engrenages droits hélicoïdaux et engrenage à denture en chevrons [Phi07]

2.1. Profil apparent et profil réel

Profil réel : profil de la denture contenu dans le plan réel, perpendiculaire à l'axe des dents.

Profil apparent : profil de la denture contenu dans le plan apparent, perpendiculaire à l'axe du cylindre primitif (figure III.5).

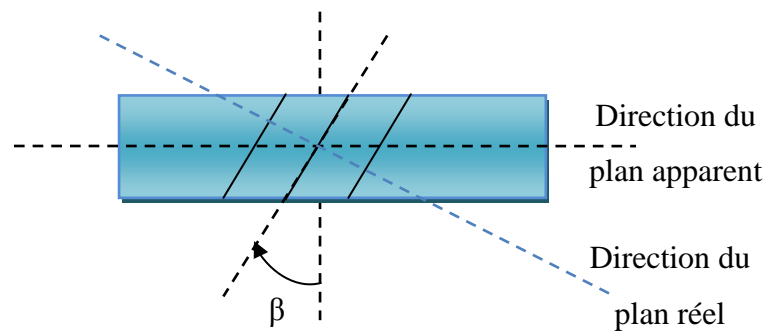


Figure III.5: Représentation des profils apparents et réels

On en déduit deux modules, le module réel m_r (standardisé) et le module apparent m_a liés par la relation suivante : [Phi07]

$$\left\{ \begin{array}{l} m_r = m_a \cdot \cos\beta \\ m_r = \frac{P'}{\pi} \\ P' = \frac{m_r}{\pi} \\ D = d + 2m_r \\ Z = \frac{d \cdot \cos\beta}{m_r} \\ r = \frac{\text{Produit des nombres de dents des roues menant}}{\text{Produit des nombres de dents des roues menées}} = \frac{N_{\text{sortie}}}{N_{\text{entrée}}} \end{array} \right. \quad (\text{III. 1})$$

Le couple mécanique transmis est égal au produit du rapport de réduction et le couple mécanique délivré par la turbine moins les pertes de transmission (C_{mp}).

$$C_m = \frac{C_{mt}}{r} - C_{mp} \quad (III.2)$$

3. Description et modélisation de la MS3E

3.1. Description de la MS3E

La machine synchrone à trois étages à pour avantage principal son absence de balais. En effet, il s'agit d'un point clé dans la conception de générateurs dédiés aux applications avioniques, ainsi dans des centrales électriques à grandes puissances dans la mesure où l'élimination de tout contact électrique frottant est un gage de sécurité et de robustesse figure (III.6).

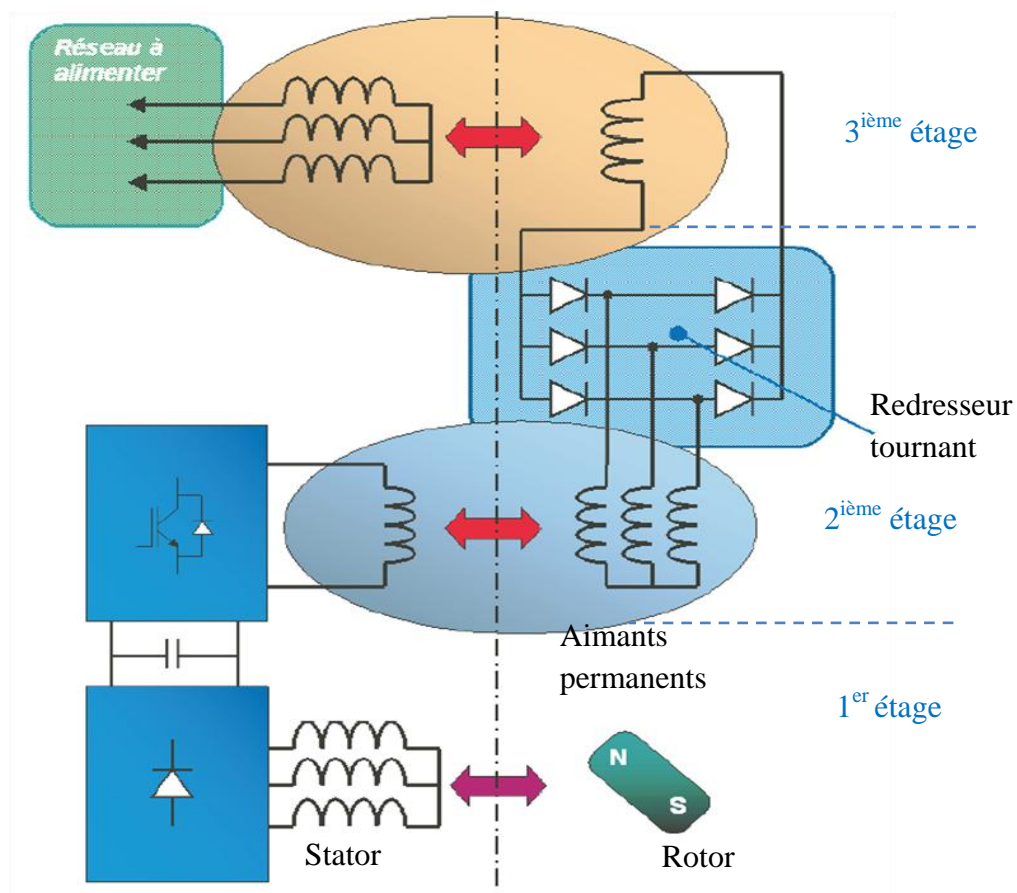


Figure III.6 : Génératrice synchrone à trois étages

La MS3E, schématisée sur la figure (III.6), est constituée de trois sous-machines en cascade. Tout d'abord, le premier étage est constitué d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP, figure III.7) : cette machine permet au générateur un fonctionnement parfaitement autonome. Les tensions délivrées par ce premier étage sont redressées afin d'alimenter un hacheur connecté à la machine suivante constituant le deuxième étage. Celle-ci est une

machine synchrone à inducteur bobiné et inverse : l'inducteur monophasé est placé au stator tandis que l'induit triphasé se trouve au rotor. Les tensions obtenues au rotor sont alors redressées (diodes tournantes) pour alimenter l'inducteur d'une troisième machine (troisième et dernier étage)-machine synchrone à inducteur à bobinage classique- connectée au réseau à alimenter. On observe donc que l'absence de balais recherchée est obtenue au prix d'une complexité certaine du générateur. L'ensemble constitué par les deux premiers étages et le redresseur tournant est connu sous le nom d'excitatrice en bout d'arbre.

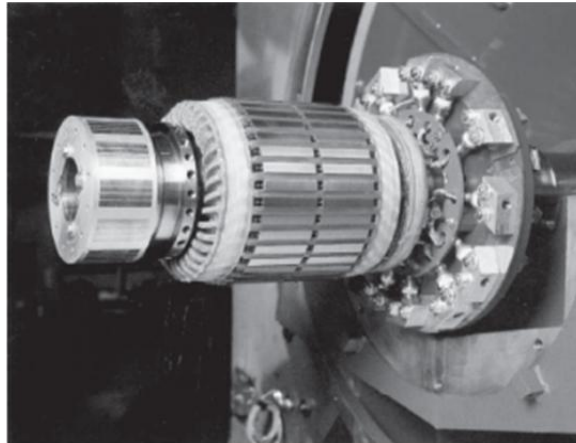


Figure III.7 : Génératrice synchrone à aimants permanents

La machine proposée est un alternateur à pôle lisse, à rotor bobiné avec amortisseurs, à couplage étoile, auto ventilé.

3.1.1. Stator

- ♣ Circuit magnétique constitué de tôles au silicium à faibles pertes laminées à froid, soigneusement ébavurées puis isolées par un revêtement à base de phosphate de fer et d'aluminium. Ce revêtement assure une résistance inter laminaire beaucoup plus élevée que celle d'un vérin organique. Il permet une tenue thermique élevée (plus de 500 C°). Il possède une très bonne tenue aux agressions chimiques et aux radiations (agrée EDF). La tôle est découpée en segments qui est ensuite encochés puis empilés en croisant les joints, se faisant sur les barres d'assemblage situées à la périphérie du circuit magnétique. Ces segments sont groupés en paquets élémentaire séparés par des canaux de ventilation permettant la circulation radiale de l'air de refroidissement.
- ♣ Le bobinage de l'alternateur se constitue d'un enroulement de type imbriqué celui-ci est réalisé à partir des bobines identiques, isolées de la masse par du ruban micacé et placés dans les encoches du circuit magnétique.

3.1.2. Rotor

♣ **Arbre**

Arbre en acier forgé largement dimensionné pour tenir compte des différents régimes de fonctionnement. Le plateau d'accouplement est usiné dans la masse, les bras sont fraisés dans la masse afin de recevoir la tôle magnétique.

♣ **Roue polaire –pôles- bobines**

L'ensemble de la roue polaire et les pôles est constitué de tôles magnétiques circulaires découpées au laser puis empilées, le passage de cette tôle est maintenu par deux(02) plateaux d'extrémité et des tiges d'empilage. L'ensemble complet est ensuite rapporté à chaud sur les bras de l'arbre et soudé aux extrémités.

♣ **Circuit amortisseur**

Le circuit amortisseur est constitué de barres en cuivre logées dans des encoches découpées dans les segments de tôles rotor. Les barres sont reliées entre elles à leurs extrémités aux plateaux de pressage de la tôle rotor.

3.2. Modélisation initiale de la MS3E dans le référentiel abc

3.2.1. Equations initiales de la machine

Considérons une machine synchrone à 2 paires de pôles avec amortisseurs (figure III.8). L'ensemble d'équations (électriques, magnétiques et mécaniques) régissant le fonctionnement de la machine est donnée dans les sections suivantes.

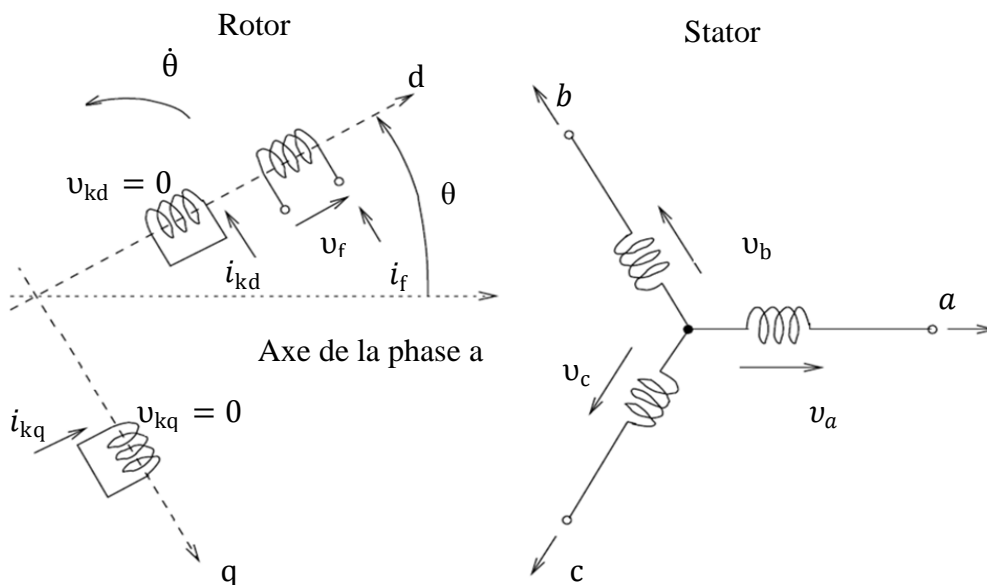


Figure III.8 : Représentation symbolique de la machine synchrone

a) Equations des tensions
♣ Enroulement statorique

$$\begin{cases} v_a = R_a i_a + \frac{d\Phi_a}{dt} \\ v_b = +R_b i_b + \frac{d\Phi_b}{dt} \\ v_c = +R_c i_c + \frac{d\Phi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

♣ Enroulement rotorique

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + \frac{d\Phi_f}{dt} \\ 0 = R_{kd} i_{kd} + \frac{d\Phi_{kd}}{dt} \\ 0 = R_{kq} i_{kq} + \frac{d\Phi_{kq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

Sous forme matricielle, les tensions statoriques s'expriment par :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{abc}] \\ [V_{fkdkq}] = [R_r][i_{fkdkq}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{fkdkq}] \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

Avec :

$$[V]_{abc} = [v_a \ v_b \ v_c]^t, \quad [V]_{fkdkq} = [v_f \ v_{kd} \ v_{kq}]^t, \quad [i]_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^t, \quad [i]_{fkdkq} = [i_f \ i_{kd} \ i_{kq}]^t$$

$$[\Phi]_{fkdkq} = [\Phi_f \ \Phi_{kd} \ \Phi_{kq}]^t, \quad [\Phi]_{abc} = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^t,$$

b) Equations magnétiques

$$\begin{cases} [\Phi_{abc}] = [L_{ss}][i_{abc}] + [M_{sr}][i_{fkdkq}] \\ [\Phi_{fkdkq}] = [L_{rr}][i_{fkdkq}] + [M_{sr}]^t[i_{abc}] \end{cases} \quad (\text{III. 6})$$

b).1 Matrice des inductances statoriques et rotorique

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_f & M_{fd} & 0 \\ M_{kdf} & L_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 7})$$

Avec :

L_f, L_{kq}, L_{kd} : Inducteur seul, et M_{fkd} inducteur mutuelle de couplage entre le bobinage inducteur et la composante directe de l'amortisseur du rotor.

On obtient

[L_{ss}]

$$= \begin{bmatrix} L_{a0} + L_{a2}\cos(2\theta) & M_{ab0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{ab0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ M_{ab0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{a0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{ab0} + L_{a2}\cos(2\theta) \\ M_{ab0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{ab0} + L_{a2}\cos(2\theta) & L_{a0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 8})$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{af}\cos(2\theta) & M_{akd}\cos(\theta) & M_{akq}\sin(\theta) \\ M_{bf}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{bkd}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{bkq}\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cf}\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{ckd}\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{ckq}\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 9})$$

c) Equation mécanique

L'équation mécanique dépend de la charge. Son expression la plus simple est :

$$C_{em} = J \frac{d}{dt} \Omega + C_m \quad (\text{III. 10})$$

Où J est l'inertie totale des parties tournante, C_m le couple de charge, C_{em} le couple électromagnétique de la machine et Ω est la vitesse mécanique du rotor.

3.3. Transformation de Park

La représentation schématique de la machine synchrone équivalente au sens de Park est donnée sur la figure (III.9).

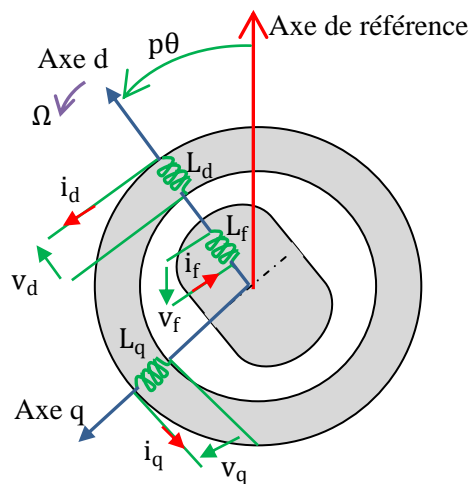


Figure III.9: Machine équivalente au sens de Park sans amortisseurs

3.3.1. Matrice de Park et relations de passage

On note le vecteur $[X]$ comme suit ($[X]$ peut être le vecteur des tensions, des flux ou des courants) :

$$[X]_{dq} = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}, \quad [X]_{fkdq} = \begin{bmatrix} X_f \\ X_{kd} \\ X_{kq} \end{bmatrix} : \text{ Dans le repère tournant de Park lié au rotor.}$$

La matrice de Park est donnée comme suit [Jea99]:

$$P(\varepsilon) = C R(\varepsilon) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & -\sin(\varepsilon) \\ \cos\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad (\text{III. 11})$$

Figure III. 9: Commanche par orientation du champ de la MS3E

Le passage du repère initial au repère de Park ou l'inverse se fait à l'aide des relations suivantes :

$$\begin{cases} [X]_{dq} = P^t(\varepsilon) [X]_{abc} \\ [X]_{abc} = P(\varepsilon) [X]_{dq} \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

3.3.2. Equations de la machine dans le repère de Park

a) Equations des flux

Les expressions des flux s'obtiennent en partant des équations (III.7) et en utilisant les relations de passage (III.11) (on prend $\varepsilon = p\theta$):

Il on résulte :

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \\ \Phi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{fd} & M_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & M_{kq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 13})$$

$$\begin{cases} L_d = L_{a0} - M_{ab0} + \frac{3}{2}L_{a2} \\ L_q = L_{a0} - M_{ab0} - \frac{3}{2}L_{a2} \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_f \\ \Phi_{kd} \\ \Phi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_f & 0 & 0 \\ M_{kd} & 0 & 0 \\ 0 & M_{kq} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_f & M_{fd} & 0 \\ M_{fd} & L_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 15})$$

On constate que le découplage entre les axes est réalisé et l'angle θ n'apparaît plus dans les équations des flux. Les expressions des inductances directe et quadratique (L_d et L_q) sont exprimées par l'équation (III.14)

b) Equations des tensions

A l'aide des équations (III.3), (III.4) et des relations de passage (III.11), on obtient les équations des tensions comme suit :

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - p\Omega\Phi_q \\ v_q = R_s i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + p\Omega\Phi_d \end{cases} \quad (III.16)$$

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + \frac{d\Phi_f}{dt} \\ 0 = R_{kd} i_{kd} + \frac{d\Phi_{kd}}{dt} \\ 0 = R_{kq} i_{kq} + \frac{d\Phi_{kq}}{dt} \end{cases} \quad (III.17)$$

c) Expression du couple électromagnétique

La puissance est conservée lors du passage du repère initial au repère de Park, son expression est la suivante :

$$P = v_f i_f + (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) = v_f i_f + (v_d i_d + v_q i_q) \quad (III.18)$$

Le développement de cette expression donne les différents termes, qui correspondent aux pertes Joule, à la puissance électromagnétique emmagasinée dans les bobinages et la puissance mécanique convertie, qui a pour expression :

$$P_{mec} = p\Omega(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (III.19)$$

L'équation du couple électromagnétique est donc :

$$C_{em} = \frac{P_{mec}}{\Omega} = p(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (III.20)$$

Où : encore :

$$C_{em} = P([L_d - L_q]i_d i_q + [M_f i_f i_q + M_{kd} i_{kd} i_q - M_{kq} i_{kq} i_d]) \quad (III.21)$$

On introduisant l'équation (III.19) dans l'équation mécanique (III.11), on obtient :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = P([L_d - L_q]i_d i_q + [M_f i_f i_q + M_{kd} i_{kd} i_q - M_{kq} i_{kq} i_d]) i_q - C_m \quad (\text{III. 22})$$

Dans le cas de la machine synchrone sans amortisseurs (MSI) les courants i_{kd} et i_{kq} sont nuls, les expressions des flux et tensions s'obtiennent en partant des équations (III.13), (III.17) (III.18), (III.22) et (III.23)

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + M i_f \\ \Phi_q = L_q i_q \\ \Phi_f = M i_d + L_f i_f \end{cases} \quad (\text{III. 23})$$

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega \Phi_q \\ v_q = +R i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega \Phi_d \\ v_f = R_f i_f + \frac{d\Phi_f}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

$$C_{em} = P([L_d - L_q]i_d i_q + M_f i_f i_q) \quad (\text{III. 26})$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega = P([L_d - L_q]i_d i_q + M_f i_f i_q) i_q - C_m \quad (\text{III. 27})$$

Dans le cas de la machine synchrone à aimants permanents (excitation constante), La troisième expression (tension d'excitation) du système d'équations (III.23) et (II.16) est inutile. Il suffit de poser :

$$M i_f = \Phi_f \quad (\text{III. 28})$$

Ainsi les équations des flux direct et quadratique deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_f \\ \Phi_q = L_q i_q \\ \Phi_f = \text{constant} \end{cases} \quad (\text{III. 29})$$

En introduisant les expressions des flux (III.28) dans les équations de tensions (III.24) et (III.16), on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p\Omega \begin{bmatrix} 0 & -L_q \\ L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (\text{III. 30})$$

Tel que : $[e]_{dq}$ représente les forces contre électromotrices directe et quadratique, proportionnelles à la vitesse Ω :

$$\begin{cases} e_d = 0 \\ e_q = p\Phi_f \Omega \end{cases} \quad (\text{III. 31})$$

Le choix de i_d et i_q comme variables d'état dans l'équation (III.28), nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R_s}{L_d} i_d + p \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega + \frac{1}{L_d} v_d \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R_s}{L_q} i_q - p \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega - p \frac{\Phi_f}{L_q} \Omega + \frac{1}{L_q} v_q \end{cases} \quad (\text{III. 32})$$

Nous considérons une machine à rotor lisse, à cet effet la matrice $[L_{s2}(\theta)]$ est nulle et $L_d = L_q$, l'équation du couple (III.25) se simplifie en :

$$C_{em} = p\Phi_f i_q \quad (\text{III. 33})$$

En tenant compte de l'équation mécanique (III.25), l'équation différentielle en vitesse mécanique sera :

$$\frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} (p\Phi_f i_q - C_m) \quad (\text{III. 34})$$

La vitesse mécanique du rotor est exprimée en fonction de la position du rotor par l'équation :

$$\Omega = \frac{d}{dt} \theta \quad (\text{III. 35})$$

L'ensemble d'équations est exprimé comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R_s}{L_d} i_d + p \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega + \frac{1}{L_d} v_d \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R_s}{L_q} i_q - p \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega - p \frac{\Phi_f}{L_q} \Omega + \frac{1}{L_q} v_q \\ \Omega = \frac{1}{J} p\Phi_f i_q - \frac{1}{J} C_m \end{cases} \quad (\text{III. 36})$$

4. Stratégie de commande de la MS3E

4.1. Principe de la commande

En reprenant l'équation (III.21), on constate que lorsque le courant i_d est nul, le couple devient proportionnel au courant i_q , en effet :

$$C_{em} = [M_f i_f + M_{kd} i_{kd}] i_q \quad (\text{III. 37})$$

Cela permet d'envisager une commande en couple de la machine par un asservissement à zéro du courant direct. Le courant quadratique de référence I_q^* est alors obtenu par la boucle de régulation de la vitesse de rotation de la génératrice (par un régulateur PI dont les paramètres sont donnés en annexe C). Il s'agit d'un pilotage vectoriel de la MS qui nécessite la connaissance de la position du vecteur flux rotorique. Elle peut être obtenue grâce à la mesure de la position angulaire du rotor à l'aide d'un capteur de position [Mir05], ou à partir d'une

estimation analytique [Nah01, Ros09]. L'annulation du courant direct, qui correspond à l'alignement du flux d'excitation sur l'axe direct fait que l'angle δ entre le vecteur force électromotrice E_s de la machine et son courant I_s est nul (figure III.10), ce qui ne permet pas d'avoir un facteur de puissance unitaire [Mir05].

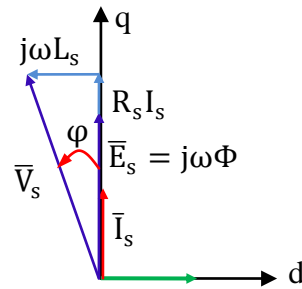


Figure III.10 : Diagramme vectoriel d'une phase statorique

On remarque que l'expression du couple électromagnétique est la même que celle d'une machine à courant continu, ou les courants : i_f et i_q produisent respectivement les flux rotorique et statorique séparément.

Le contrôle de la vitesse de rotation de la machine permet de venir se placer à un point de fonctionnement optimal du point de vue de l'extraction de puissance. Son contrôle va venir agir sur la composante i_q (figure III.11).

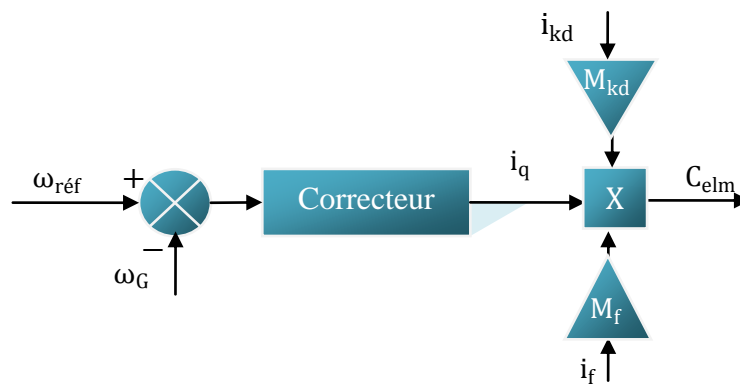


Figure III.11 : Contrôle de la vitesse de la génératrice ω_G

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$FTBO_{\Omega} = \frac{k_p}{p} \left(p + \frac{k_i}{k_p} \right) \frac{1}{Jp + f} \quad (III. 38)$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ($Cr=0$) :

$$FTBO_{\Omega} = \frac{\Omega(p)}{\Omega_{ref}(p)} = \frac{k_p \left(p + \frac{k_i}{k_p} \right)}{J p^2 + (f + k_p) p + k_i} \quad (III. 39)$$

La $FTBO_{\Omega}$ possède une dynamique de 2ème ordre, par identification à la forme canonique du 2ème ordre l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0} p^2 + \left(\frac{2\zeta}{\omega_0} \right) p + 1 \quad (III. 40)$$

Alors :

$$\begin{cases} \frac{J}{k_i} = \frac{1}{\omega_0^2} \\ \frac{f + k_p}{k_i} = \frac{2\zeta}{\omega_0} \end{cases}$$

On trouve :

$$\begin{cases} k_i = J\omega_0^2 \\ k_p = \frac{2\zeta k_i}{\omega_0} - f \end{cases} \quad (III. 41)$$

Le schéma de la figure (III.12) donne le principe de la commande adoptée pour la génération des signaux de commande du redresseur.

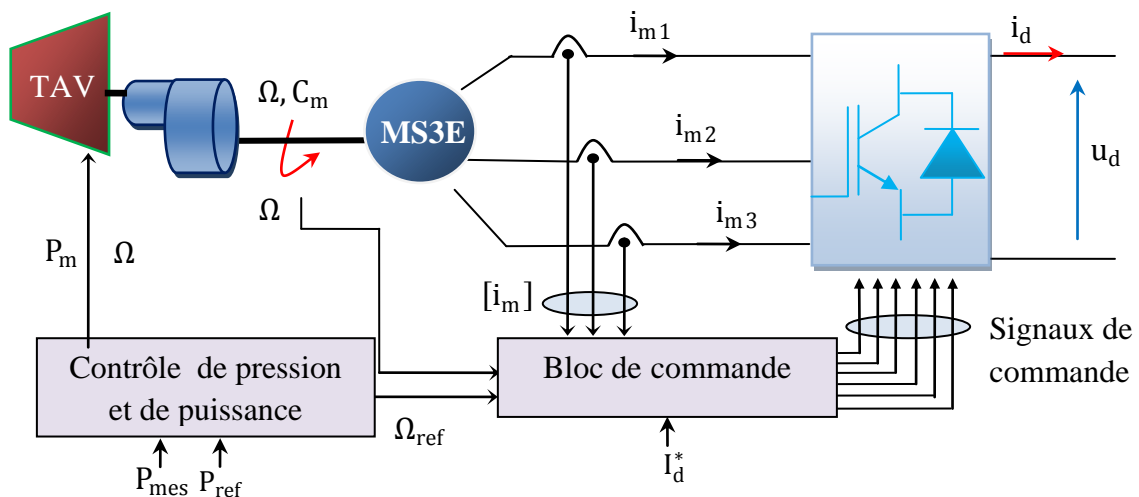


Figure III.12 : Principe de la commande du redresseur (côté machine)

4.2. Régulation des courants

Le principe général de ce type de stratégie consiste à maintenir la variation du courant dans chaque phase dans une bande de largeur donnée, centrée autour des courants de référence. Ce principe est schématisé par la figure (III.13).

Cette stratégie permet une réaction rapide à des variations de la consigne ou des paramètres de la partie puissance (charge).

Un comparateur à hystérésis mesure la différence entre le courant réel et sa référence

$$\Delta i_s = i_s - i_{s\text{réf}} = h \quad (\text{III. 42})$$

- ♣ Si : $\Delta i_s \geq h$ la tension est forcée à son niveau minimal pour faire décroître le courant,
- ♣ et le comparateur à hystérésis sature à T' qui continue à conduire
- ♣ Si : $\Delta i_s \leq -h$ la tension est forcée à son niveau maximal pour faire accroître le courant, et le comparateur à hystérésis bascule et sature à T d'où la nature itérative de l'opération.

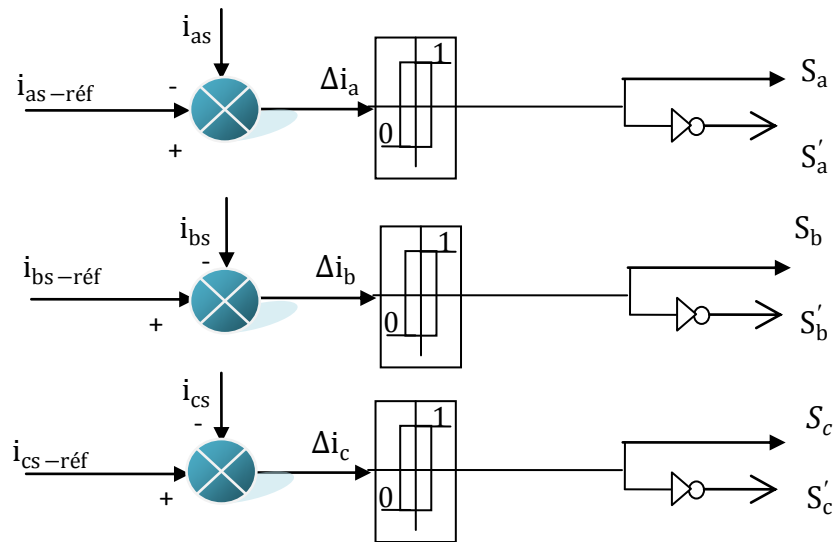


Figure III. 13 : Comparaison des courants de références avec les courants réels

Pour chaque bras de l'onduleur, les transistors T_i et T_i' sont reliés l'un à la sortie du comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur. L'entrée du comparateur est attaquée par la différence Δi entre le courant réel i_s et le courant de référence $i_{s\text{réf}}$. Le changement de signe de cette différence entraîne le basculement du comparateur, par conséquent l'un des deux transistors T_i ou T_i' qui conduisait initialement cesse de conduire et laisse la relève à l'autre.

Les fonctions logiques S_i représentant l'état des interrupteurs sont définies par les équations

$$\begin{cases} S_i(k+1) = 0 & \text{si: } \Delta i > h \\ S_i(k+1) = 1 & \text{si: } \Delta i < -h \\ S_i(k+1) = S_i(k) & \text{si: } -h < \Delta i < h \end{cases} \quad (\text{III. 43})$$

Les courants de références sont :

$$\begin{cases} i_{as-réf} = i_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t) \\ i_{bs-réf} = i_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_{cs-réf} = i_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (III. 44)$$

5. Modèle mathématique du convertisseur MLI

Le convertisseur statique est un élément clé dans la chaîne de conversion d'énergie, l'utilisation d'interrupteurs totalement commandables (commutation forcée) permet le contrôle des puissances active et réactive du côté de la machine comme du côté du réseau. La figure (III.14) représente un convertisseur à six interrupteurs commandés.

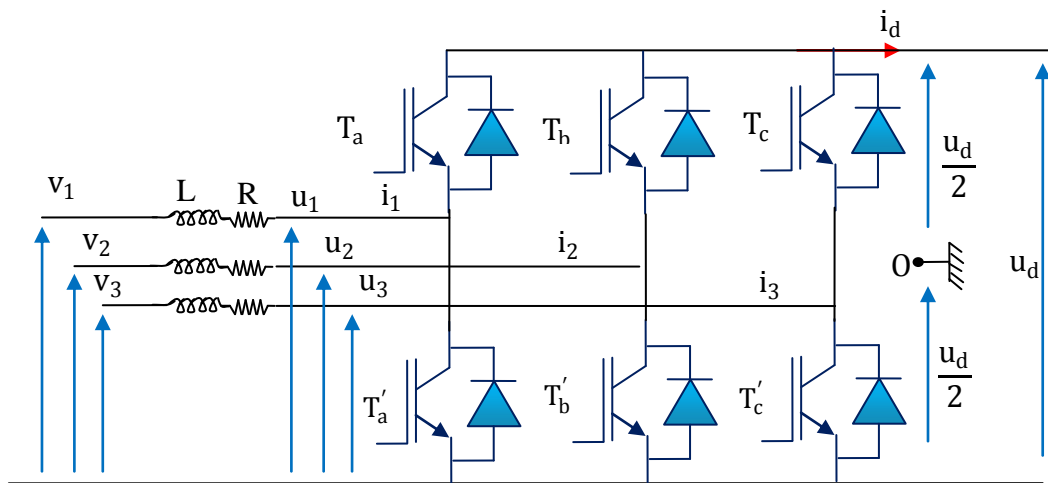


Figure III.14: Schéma de principe du convertisseur statique

Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un IGBT et d'une diode en antiparallèle. Il permet un fonctionnement à fréquence fixe (côté réseau) au variable (côté machine). Les tensions v_1 , v_2 et v_3 représentent les forces contre électromotrices de la MS3E ou les tensions du réseau. Les éléments (R, L) représentent la résistance et l'inductance de la machine ou celle du filtre du raccordement au réseau.

Les équations électriques relatives au schéma s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} v_1 - u_1 = L \frac{di_1}{dt} + R i_1 \\ v_2 - u_2 = L \frac{di_2}{dt} + R i_2 \\ v_3 - u_3 = L \frac{di_3}{dt} + R i_3 \end{cases} \quad (III. 45)$$

$$i_d = \sum_{j=1}^3 (F_j i_j) \quad (III. 46)$$

F_j : désigne la fonction de commutation relative à l'interrupteur haut de chaque bras du convertisseur ($j=1, 2,3$), elle est obtenue à la sortie des régulateur à hystérésis (MLI à hystérésis) ou par la MLI triangulo-sinusoidale.

En exprimant les tensions de phase par rapport au point milieu O et en considérant un système triphasé équilibré, on aboutit au modèle mathématique du convertisseur [Cap02, Gom05]:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \frac{u_d}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 47})$$

6. Régulation de la tension du bus continu

La tension continue, en amont du convertisseur DC/AC, est maintenue constante à sa valeur de référence à l'aide d'un hacheur survolteur. La commande du hacheur est obtenue à partir de la boucle de régulation de la tension u_{dc} . Le circuit électrique du bus continu est donné par la figure (III.15).

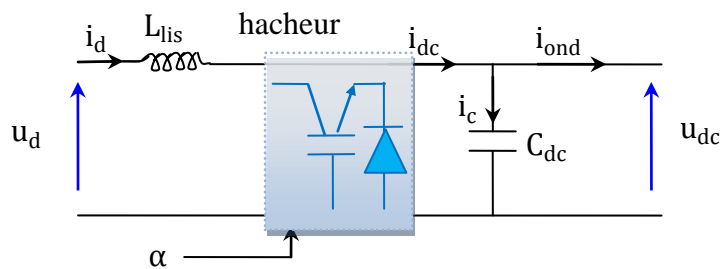


Figure III.15: Bus continu avec un hacheur survolteur

Les relations entre les courants et les tensions en amont et en aval du hacheur sont données par les expressions suivantes (α est le rapport cyclique du hacheur) :

$$\begin{cases} u_{dc} = \frac{1}{1 - \alpha} u_d \\ i_{dc} = (1 - \alpha) i_d \end{cases} \quad (\text{III. 48})$$

Les équations électriques en aval du hacheur s'expriment par les relations suivantes

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (i_{dc} - i_{ond}) \quad (\text{III. 49})$$

$$i_c = i_{dc} - i_{ond} \quad (\text{III. 50})$$

L'inversion directe de l'équation (III.49) donne le courant I_{ond}^* de référence qui s'exprime comme suit [Ham08]:

$$I_{\text{ond}}^* = i_{\text{dc}} - \text{PI}(p)(U_{\text{dc}}^* - u_{\text{dc}}) \quad (\text{III. 51})$$

U_{dc}^* : est la tension continue de référence.

On peut considérer la fonction de transfert entre les courants I_{ond}^* et i_{ond} du premier ordre avec une dynamique très élevée pour la synthèse du correcteur ; parce que la dynamique du courant est en général plus rapide que celle de la tension [Ham08]. Le schéma global de régulation est donné sur la figure (III.16), les paramètres figurant sur le schéma sont donnés en annexe C.

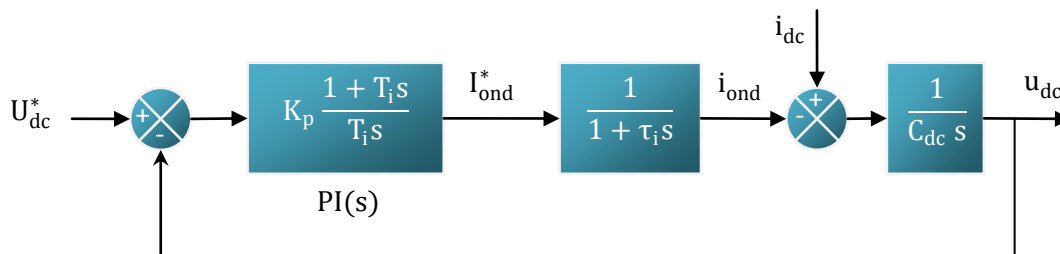


Figure III.16 : Régulation de la tension du bus continu

La puissance active est exprimée par le produit du courant continu par la tension comme suit :

$$P_{\text{dc}} = u_{\text{dc}} i_{\text{dc}} \quad (\text{III. 52})$$

7. Modélisation du système d'excitation

7.1. Régulation du courant d'excitation

Le courant d'excitation, de la MS3E, est régulé à l'aide d'un hacheur série. La commande de ce dernier est obtenue à partir de la boucle de régulation du courant d'excitation (i_f) à la sortie de la machine et celui calculé à base de l'énergie réactive (i_{exc}). Le schéma fonctionnel est donné par la figure (III.17).

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \quad (\text{III. 53})$$

En remplaçant les équations des tensions et flux (III. 11, 12 et 14) dans (III.51), on aura :

$$\begin{aligned} Q = & R i_q i_d + L_q \frac{d}{dt} i_q \cdot i_d + M_{kq} \frac{d}{dt} i_{kq} \cdot i_d + p \Omega L_d i_d^2 + p \Omega M_{fd} i_{\text{exc}} \cdot i_d + p \Omega M_{kd} i_{kd} \cdot i_d - \\ & R_s i_d i_q - L_d \frac{d}{dt} i_d \cdot i_q + M_{fd} \frac{d}{dt} i_{\text{exc}} \cdot i_q + M_{kd} \frac{d}{dt} i_{kd} \cdot i_q + p \Omega L_q i_q^2 + \\ & p \Omega M_{kq} i_{kq} \cdot i_q \end{aligned} \quad \text{III.54}$$

$$i_d p \Omega M_{fd} i_{exc} + M_{fd} \frac{d}{dt} i_{exc} \cdot i_q =$$

$$Q - R i_q i_d - L_q \frac{d}{dt} i_q \cdot i_d - M_{kq} \frac{d}{dt} i_{kq} \cdot i_d - p \Omega L_d i_d^2 - p \Omega M_{kd} i_{kd} \cdot i_d + R_s i_d i_q + L_d \frac{d}{dt} i_d \cdot i_q -$$

$$M_{kdd} i_{kd} \cdot i_q - p \Omega L_{qk} i_q^2 - p \Omega M_{kq} i_{kq} \cdot i_q \quad \text{III.55}$$

$$i_{exc} = \frac{Q - P(L_q i_q + M_{kq} i_{kq}) i_d - p \Omega (L_d i_d + M_{kd} i_{kd}) i_d}{p \Omega M_{fd} i_d - i_q M_{fd} P} + \frac{P(L_d i_d + M_{kd} i_{kd}) i_q - p \Omega (L_q i_q + M_{kq} i_{kq}) i_q}{p \Omega M_{fd} i_d - i_q M_{fd} P} \quad \text{(III. 56)}$$

Pour $Q = 0$, l'équation (III. 56) devient

$$i_{exc} = \frac{-P(L_q i_q + M_{kq} i_{kq}) i_d - p \Omega (L_d i_d + M_{kd} i_{kd}) i_d}{p \Omega M_{fd} i_d - i_q M_{fd} P} + \frac{P(L_d i_d + M_{kd} i_{kd}) i_q - p \Omega (L_q i_q + M_{kq} i_{kq}) i_q}{p \Omega M_{fd} i_d - i_q M_{fd} P} \quad \text{(III. 57)}$$

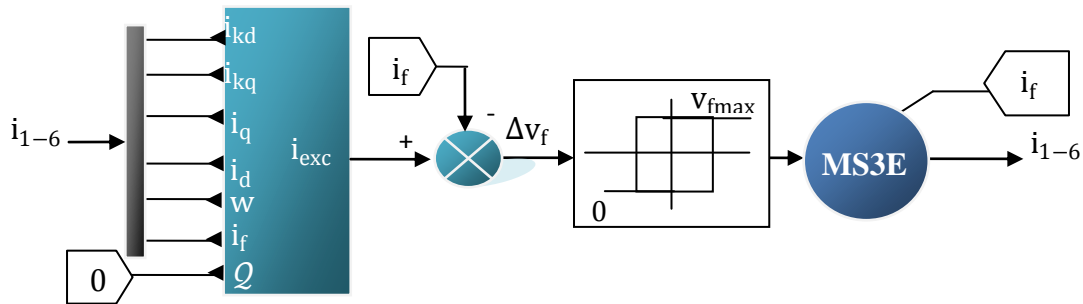


Figure III.17: Schéma de régulation du courant d'excitation

Une simulation de la chaîne complète sous Matlab\ Simulink est effectuée (figure III.1) à vitesse constante et à excitation variable, les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures (III.18) (III.19). Les paramètres de toute la chaîne sont donnés en annexe C.

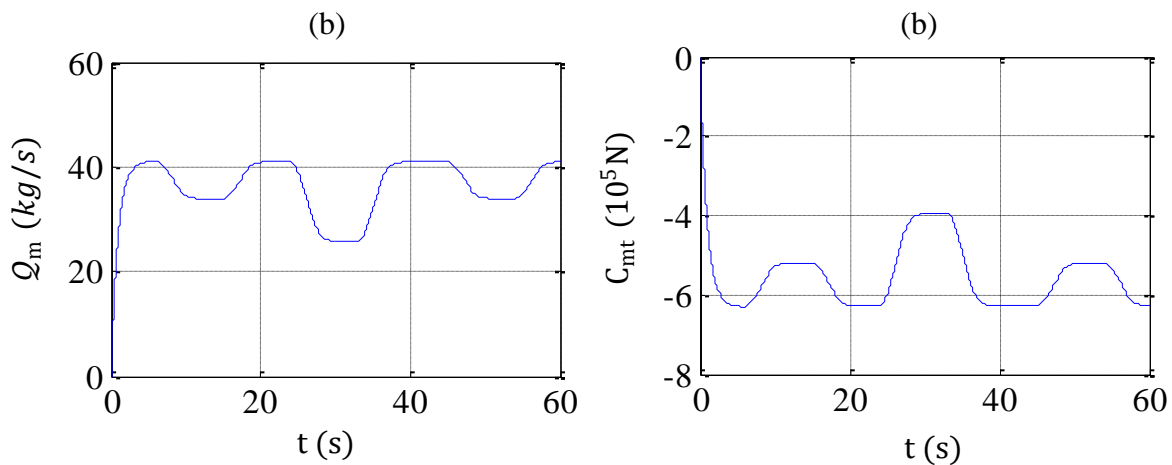


Figure III.18 : Débit de vapeur et couple mécanique délivré par la TAV

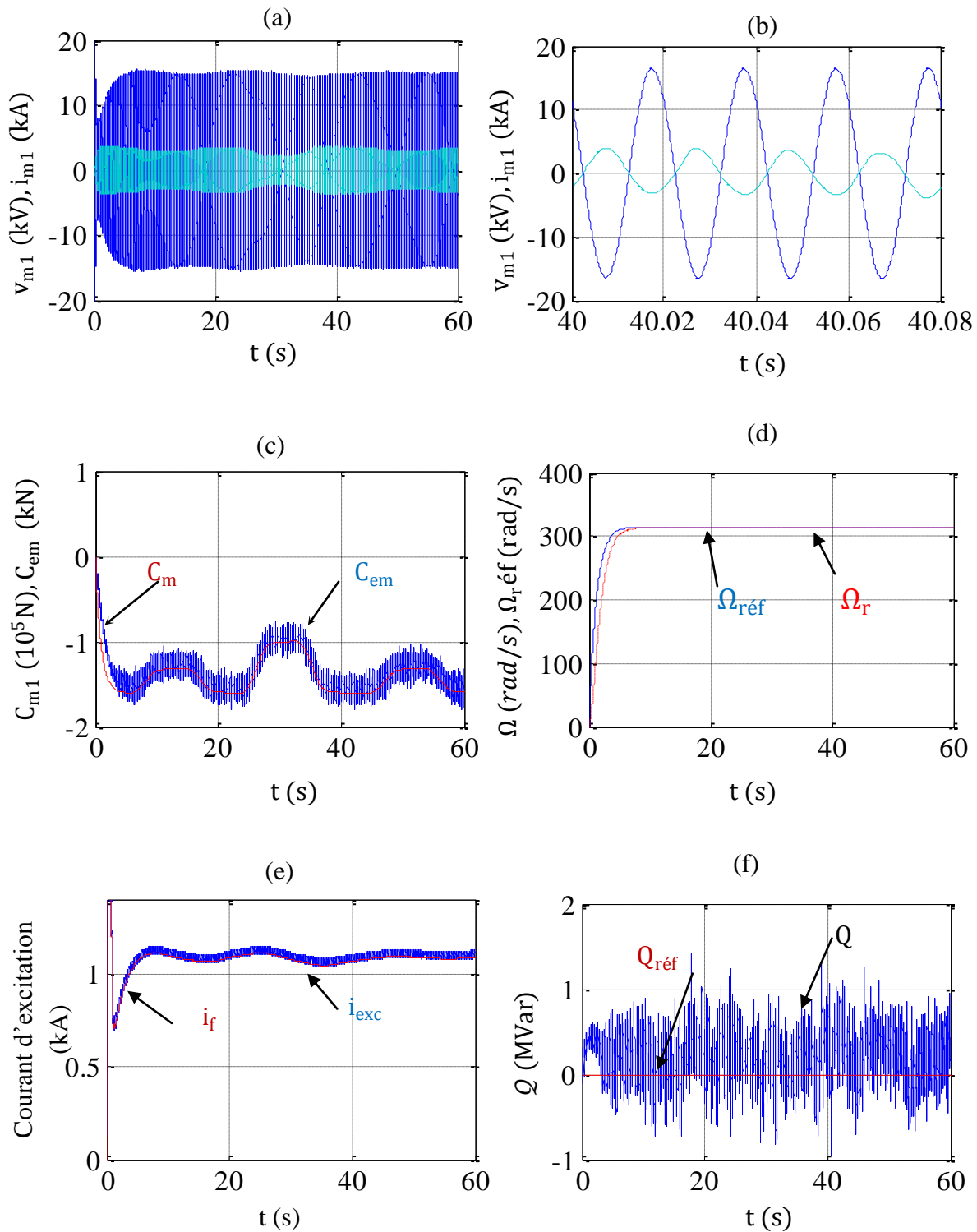


Figure III.19 : Tension, courant, couple, puissances et facteur de puissance côté machine

Le contrôle par des régulateurs à hystérésis a permis d'avoir des courants de forme sinusoïdale (figure III.19.a, b). Le couple électromagnétique de la MS3E suit le couple mécanique délivré par TAV (figure III.19.c), ainsi que la puissance active et la puissance mécanique de la TAV.

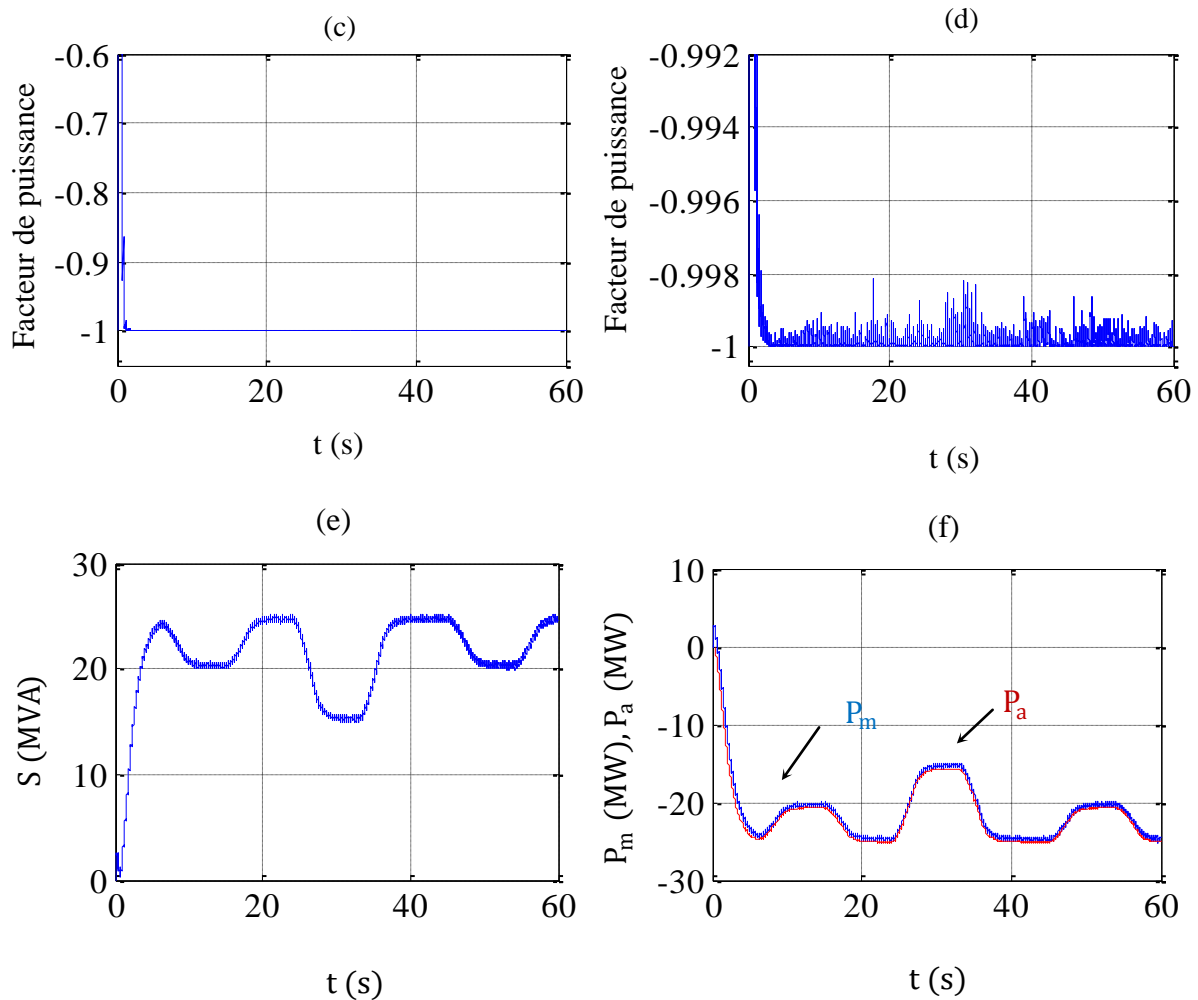


Figure III.20 : Puissances, courant d'excitation et facteur de puissance côté machine

Le courant d'excitation est variable selon la variation de la tension à la sortie de la machine principale, et suit également les variations de la puissance produite c'est-à-dire chaque débit de vapeur produit correspond à un courant d'excitation. Le contrôle de l'excitation nous a permis de fonctionner à facteur de puissance unitaire (figure III.20c), c'est-à-dire une compensation totale de l'énergie réactive.

La tension d'une phase raccordée au réseau ainsi que le courant sont présentés sur la figure (III.21.a, b), leur fréquence est de 50 Hz (fréquence du réseau électrique). Le déphasage angulaire de 180° entre l'onde du courant et celle de la tension est justifié par le fonctionnement à facteur de puissance unitaire imposé par la commande (figure III.21.c), à cet effet on constate bien que la puissance réactive est nulle selon sa référence imposée et la puissance active suit également sa référence (figure III.21.d).

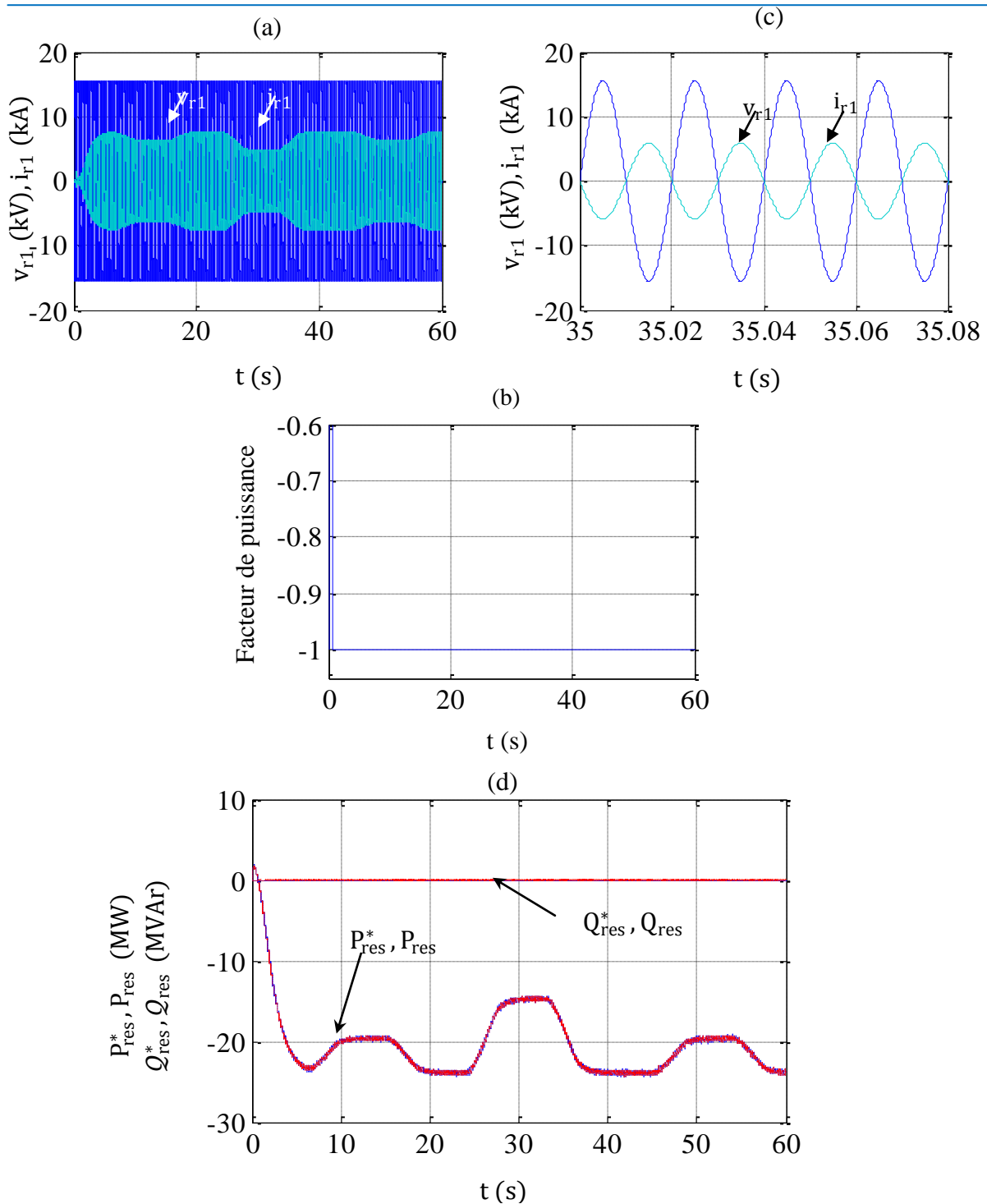


Figure III.21: Tension, courant, puissances et facteur de puissance côté réseau

8. Connexion indirecte au réseau électrique

8.1. Commande de l'onduleur du côté réseau électrique

La commande de l'onduleur côté réseau a pour but d'avoir des courants et des tensions qui ont des formes d'ondes acceptables (aussi proche de la sinusoïde que possible) et assurer un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire. Par conséquent, la puissance réactive

de référence est nulle et la puissance active correspond à la puissance délivrée par la TAV. Le schéma de la figure (III.22) donne la stratégie de commande adoptée pour l'onduleur.

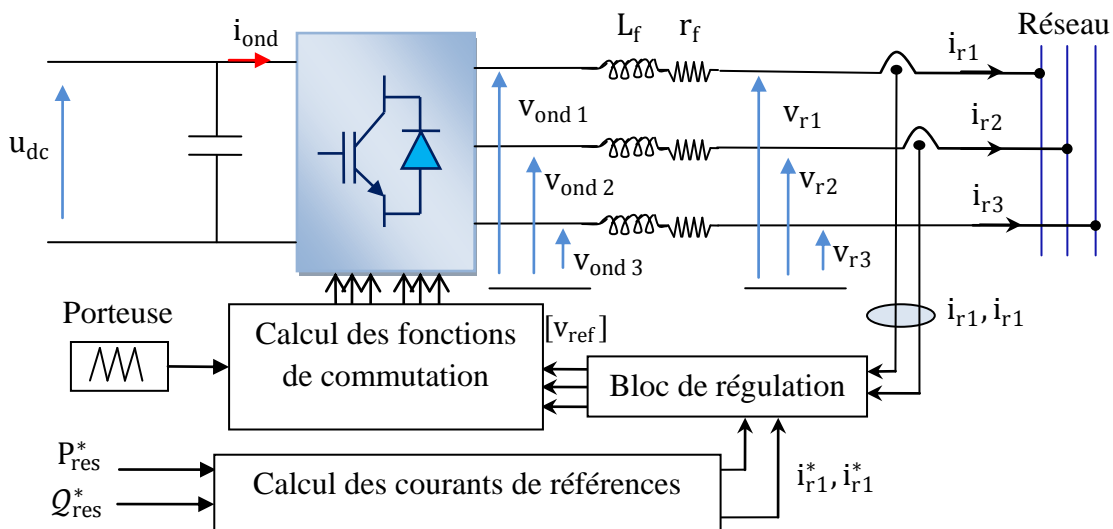


Figure III.22: Commande de l'onduleur du côté réseau électrique

8.1.1. Régulation des courants

Les équations électriques en aval de l'onduleur sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} v_1 = v_{r1} + r_f i_{r1} + L_f \frac{d}{dt} i_{r1} \\ v_2 = v_{r2} + r_f i_{r2} + L_f \frac{d}{dt} i_{r2} \\ v_3 = v_{r3} + r_f i_{r3} + L_f \frac{d}{dt} i_{r3} \end{cases} \quad (\text{III. 58})$$

On considère un système de tensions triphasé équilibré, par conséquent on peut écrire :

$$i_{r1} + i_{r2} + i_{r3} = 0 \quad (\text{III. 59})$$

Donc

$$i_{r3} = -(i_{r1} + i_{r2}) \quad (\text{III. 60})$$

En introduisant l'opérateur de Laplace dans les deux premières équations du système (III.48), les courants s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} I_{r1} = \frac{1}{r_f + L_f s} (V_{ond 1} - V_{r1}) \\ I_{r2} = \frac{1}{r_f + L_f s} (V_{ond 2} - V_{r2}) \end{cases} \quad (\text{III. 61})$$

En partant du modèle mathématique de l'onduleur (équation III.47), on définit les fonctions de conversion m_1 et m_2 comme suit [Aim04, Ham08]:

$$[m_1 \ m_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} [F_1 \ F_2 \ F_3]^t \quad (\text{III. 62})$$

Tel que : $m_1, m_2 \in \{-1, 0, 1\}$

Les tensions composées modulées dans ce cas sont exprimées par :

$$\begin{pmatrix} U_{13} \\ U_{23} \end{pmatrix} = U_{dc} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} \quad (\text{III. 63})$$

Tel que :

$$\begin{cases} U_{13} = v_{ond 1} - v_{ond 3} \\ U_{23} = v_{ond 2} - v_{ond 3} \end{cases} \quad (\text{III. 64})$$

Les tensions simples modulées peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{pmatrix} v_{ond 1} \\ v_{ond 2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_{13} \\ U_{23} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 65})$$

La qualité d'onde des tensions modulées dépend des performances de la régulation de la tension du bus continu. Les tensions de références sont obtenues par inversion directe de la relation (III.65), ce qui donne [Ham08]:

$$\begin{pmatrix} U_{13}^* \\ U_{23}^* \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_{ond 1}^* \\ v_{ond 2}^* \end{pmatrix} \quad (\text{III. 66})$$

Les tensions simples de références, sont exprimées par la relation suivante [Ham08]:

$$\begin{pmatrix} v_{ond 1}^* \\ v_{ond 2}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{f1}^* \\ v_{f2}^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{r1} \\ v_{r2} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 67})$$

La régulation des courants envoyés au réseau, donne à la sortie des PI les tensions de références v_{f1}^* et v_{f2}^* , en effet [Ham08]:

$$\begin{pmatrix} v_{f1}^* \\ v_{f2}^* \end{pmatrix} = \text{PI}(s) \begin{pmatrix} i_{r1}^* - i_{r1} \\ i_{r2}^* - i_{r1} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 68})$$

La boucle de régulation du courant réseau est donnée sur la figure (III.23).

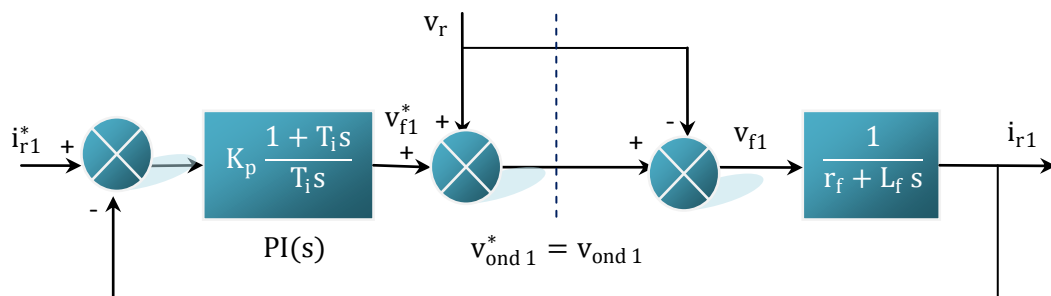


Figure III.23: Régulation du courant envoyé au réseau

Pour la synthèse des correcteurs PI, on respecte l'hypothèse suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{ond1}^* \\ v_{ond2}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ond1} \\ v_{ond2} \end{pmatrix} \quad (III. 69)$$

Les paramètres des régulateurs et les détails de leur calcul sont donnés en annexe C.

8.1.2. Calcul des courants de références

La puissance réactive de référence est imposée nulle, en vue d'un fonctionnement à facteur de puissance unitaire du côté réseau électrique :

$$Q_{res}^* = 0 \quad (III. 70)$$

La référence de la puissance active injectée au réseau est la puissance de la MS3E

$$P_{res}^* = P_a \quad (III. 71)$$

Pour la prise en compte des pertes dans la chaîne de conversion, on peut introduire un rendement approximatif, qui n'est basé sur aucun calcul préalable, ainsi la puissance de référence devienne :

$$P_{res}^* = \eta P_a \quad (III. 72)$$

Les puissances active et réactive sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} P_a = v_d i_d + v_q i_q \\ Q = v_q i_d - v_d i_q \end{cases} \quad (III. 73)$$

Les courants de références du réseau électrique, exprimés dans le référentiel de Park, sont donnés par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} i_{rd}^* \\ i_{rq}^* \end{pmatrix} = \frac{1}{v_{rq}^2 + v_{rd}^2} \begin{pmatrix} P_{res}^* & -Q_{res}^* \\ Q_{res}^* & P_{res}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{pmatrix} \quad (III. 74)$$

Une simulation de la chaîne complète sous Matlab\ Simulink est effectuée (figure III.2) à excitation fixe, les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures (III.24), figure (III.25) et figure(III.26). Les paramètres de toute la chaîne sont donnés en annexe C.

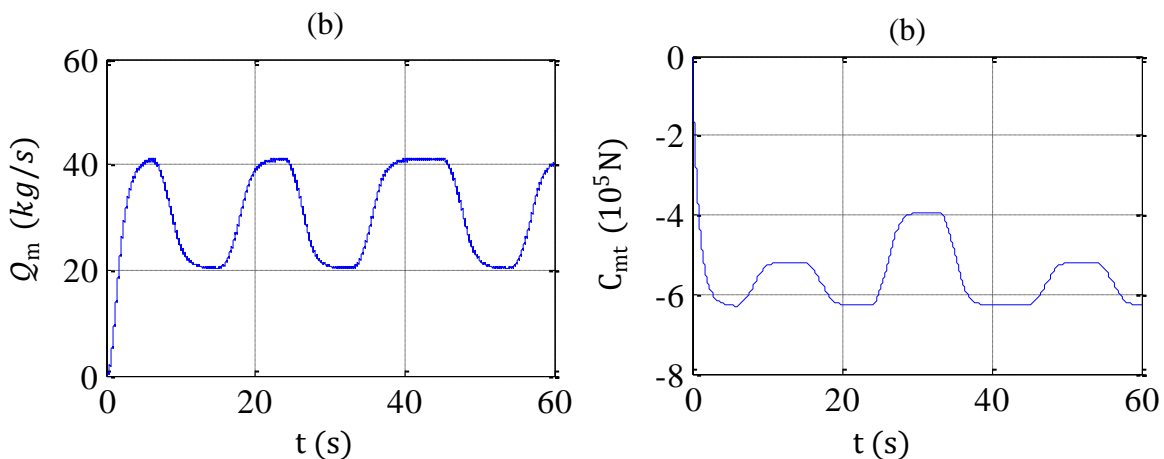


Figure III.24 : Débit de vapeur et couple mécanique délivré par la TAV

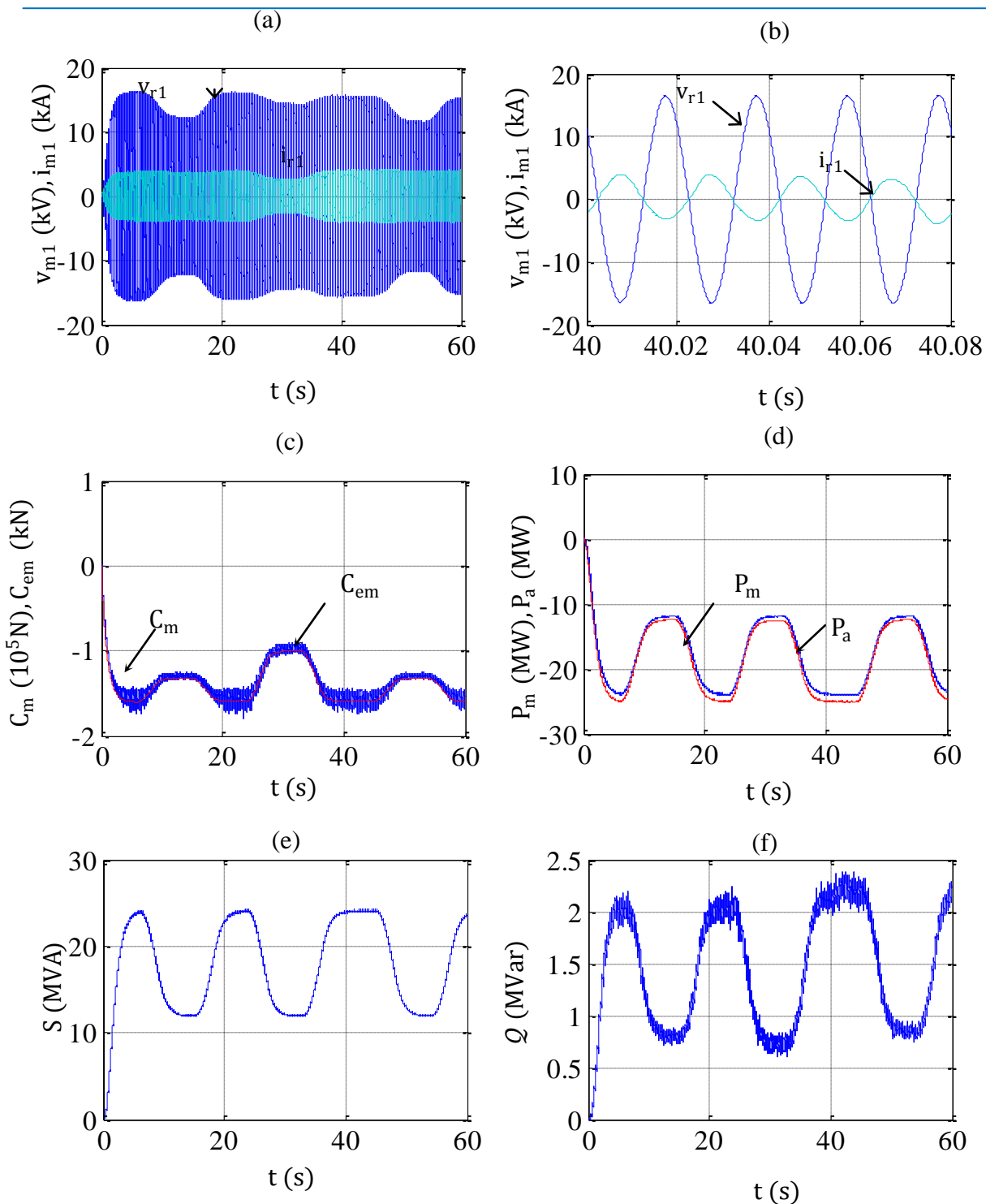


Figure III.25 : Tension, courant puissances et couple côté machine

Le contrôle par des régulateurs à hystérésis a permis d'avoir les même résultats pour la tension et le courant (figure III.25 a, b) côté machine. Le couple électromagnétique de la MS3E suit le couple mécanique délivré par TAV (figure III.25.c), ainsi la vitesse est maintenue au tour de la vitesse de rotation à la sortie du réducteur. La puissance réactive

n'est pas nulle (figure III.25.f), néanmoins le facteur de puissance (figure III.26.b) reste proche de l'unité.

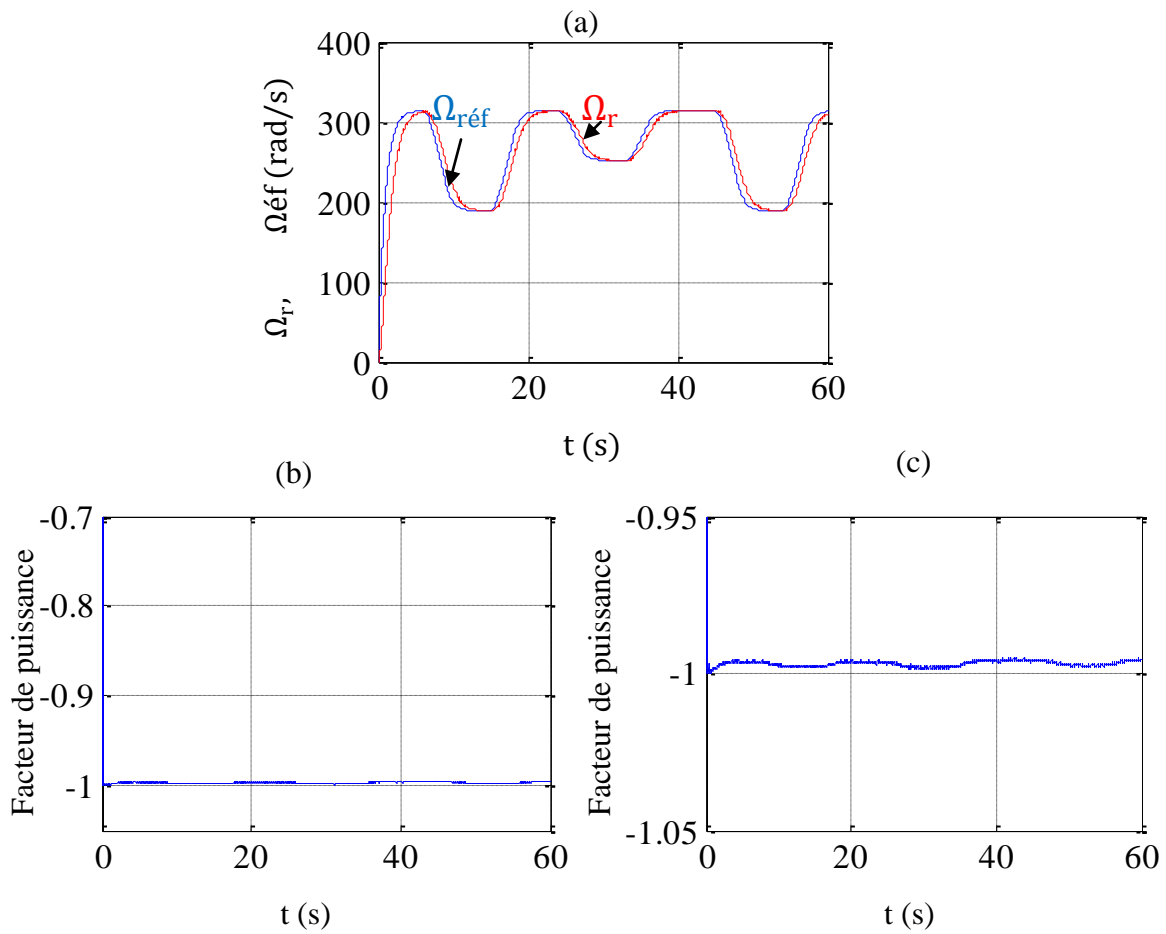


Figure III.26 : Facteur de puissance et vitesse côté machine

Les tensions, les courants ainsi que la puissance au niveau du bus continu sont présentés sur la figure (III.27) et figure (III.28).

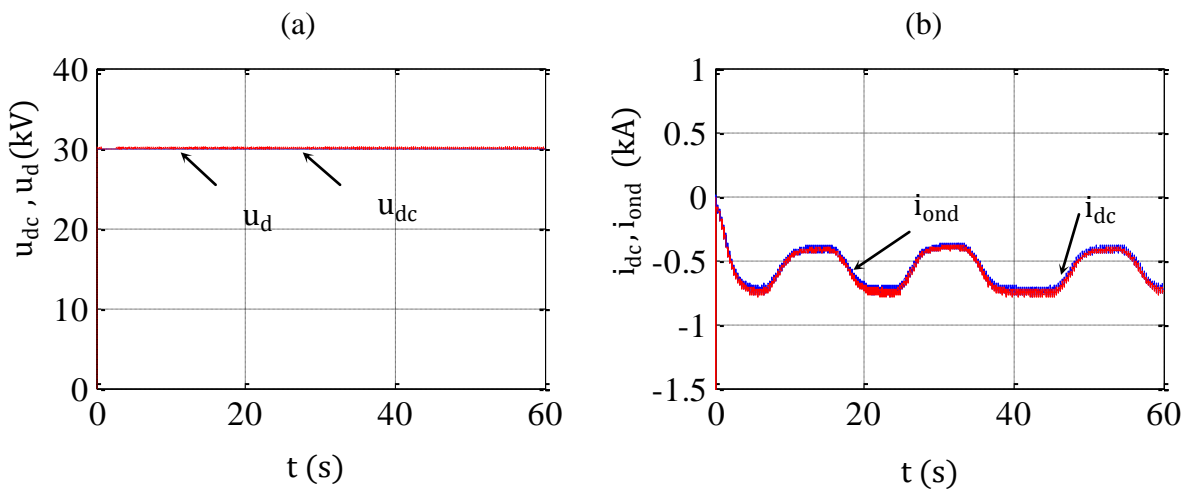


Figure III.27: Tension et courant du bus continu

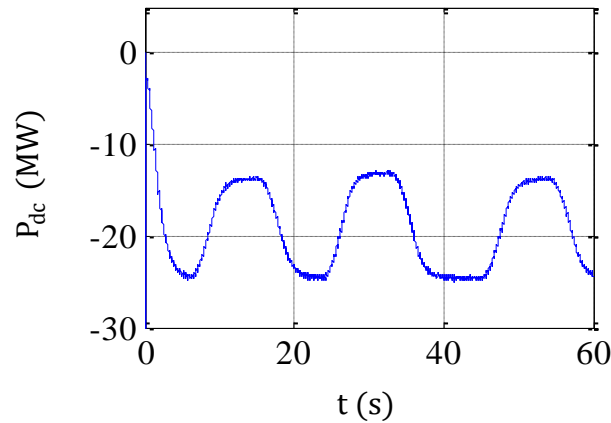


Figure III.28: Puissance du bus continu

La tension d'une phase à la sortie de l'onduleur est donnée sur la figure (III.29 a, b), les signaux de commande imposés à l'onduleur sont obtenus grâce à la comparaison des tensions de références avec une porteuse triangulaire caractérisée par un indice de modulation et un coefficient de réglage égaux à 21 et 0,8 respectivement.

La tension d'une phase raccordée au réseau ainsi que le courant sont présentés sur la figure (III.30 a, b), leur fréquence est de 50 Hz (fréquence du réseau électrique). Le déphasage angulaire de 180° entre l'onde du courant et celle de la tension est justifié par le fonctionnement à facteur de puissance unitaire imposé par la commande (figure III.30.c), à cet effet on constate bien que la puissance réactive est nulle selon sa référence imposée et la puissance active suit également sa référence (figure III.30.c).

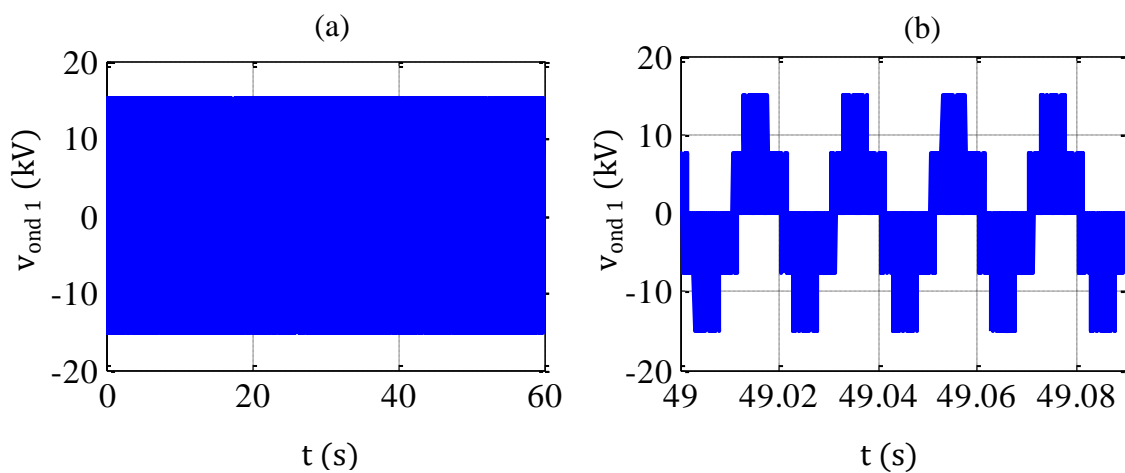


Figure III.29: Tension à la sortie du l'onduleur côté réseau

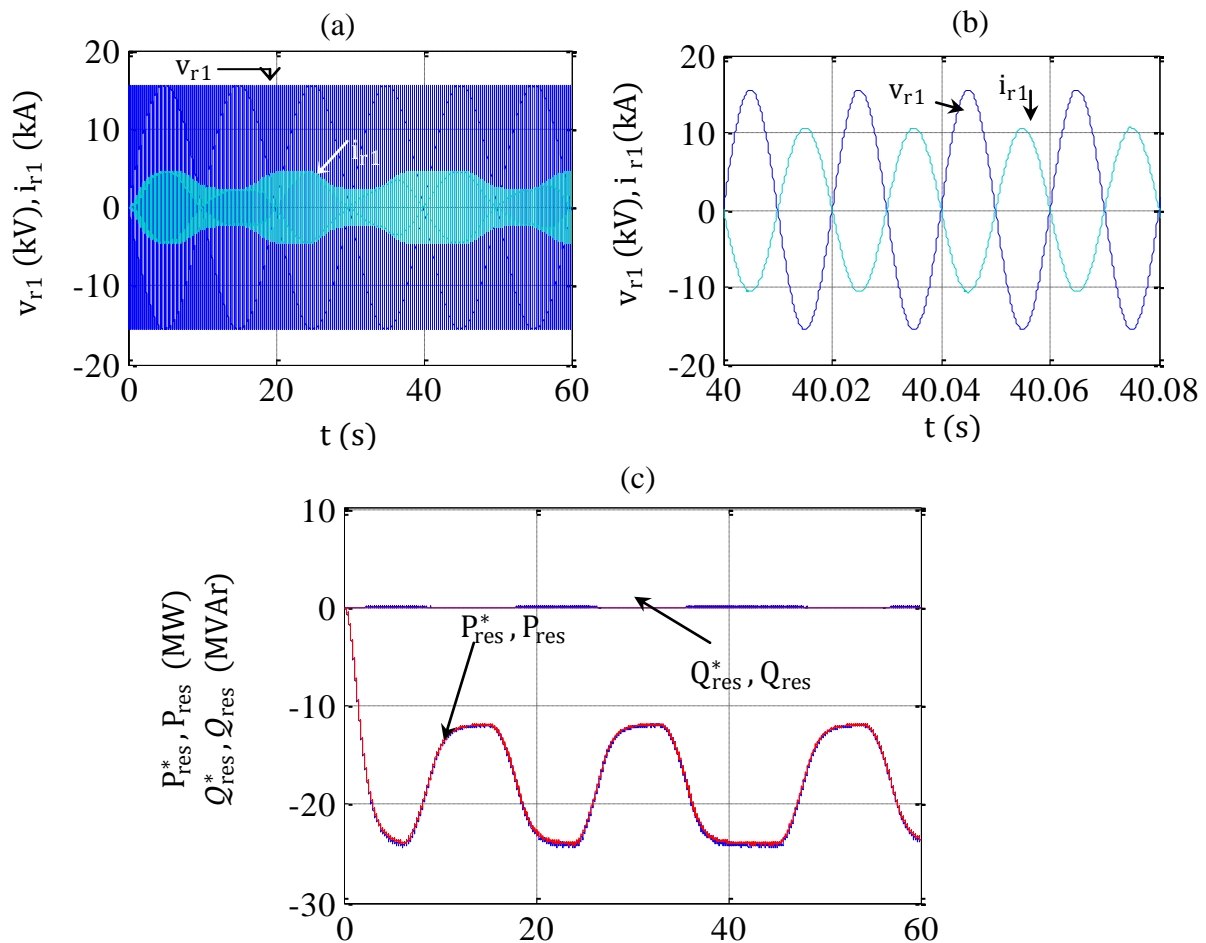


Figure III.30: Puissances du côté du réseau électrique

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé le modèle d'un système de production électrique reposant sur l'utilisation d'une TAV, d'une génératrice synchrone à grande vitesse et des convertisseurs électroniques de puissance, la première partie est consacrée à la modélisation de la chaîne de conversion, à excitation variable de la MS3E basé sur la mesure du courant d'excitation à la sortie de la machine et le courant d'excitation calculé à partir de l'expression de l'énergie réactive. Dans un second lieu, des simulations numériques ont été menées pour deux cas de fonctionnement. Le premier cas est basé sur une simulation à connexion directe au réseau électrique à vitesse fixe et excitation variable, la régulation de la vitesse est assurée par le régulateur côté turbine, le contrôle de courant d'excitation permet d'avoir une compensation totale de l'énergie réactive, et le réglage de la charge selon la consigne imposée. Le deuxième cas est une connexion indirecte au réseau à vitesse variable, dont l'excitation de MS3E est considérée constante. Les résultats de simulation ont montré que la connexion directe est plus avantageuse que la connexion indirecte, du côté de la compensation de l'énergie réactive (facteur de puissance unitaire), du coût des convertisseurs statiques et de leur maintenance.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'industrialisation, la croissance démographique et le concept avant-gardiste de développement durable constituent les principaux moteurs de croissance de la consommation et donc de production de l'énergie, en quantité et en qualité.

En effet, par le coût de l'énergie primaire et les contraintes environnementales, institutionnalisées par les directives, les chartes et les protocoles nationaux et internationaux, les constructeurs d'équipements et les concepteurs de process de production et de transformation d'énergie ont fait de l'efficacité énergétique un vrai challenge. Outre l'orientation des efforts sur l'énergie renouvelable, des avancées significatives sont enregistrées dans l'amélioration des rendements des centrales à l'énergie fossile par l'introduction de la cogénération. Aussi des procédés innovants permettent aujourd'hui de réduire les effets des émissions de gaz sur l'environnement. Le captage du CO₂ et les brûleurs à technologie bas NOx en sont un premier gage.

L'objectif visé dans ce travail est la gestion de l'énergie électrique dans une centrale de cogénération alimentant un réseau électrique, en minimisant autant que possible la consommation du combustible (gaz naturel). Nous avons abordé la problématique de la pollution issue de la combustion et le contrôle de la puissance générée par la turbine à vapeur dans une chaîne de conversion d'énergie raccordée au réseau électrique.

Dans un contexte lié à la production d'énergie, un état de l'art de la centrale de cogénération et de différentes technologies est présenté dans le premier chapitre. Cette dernière s'intègre dans tout établissement possédant des besoins de chaleur et d'électricité importants. En outre, elle apporte de nombreux avantages à son propriétaire, tant du point de vue économique, social et environnemental. La production d'électricité d'origine thermique est de plus en plus importante et les performances des turbines et les moteurs sont en évolution permanente afin d'améliorer le rendement énergétique, d'améliorer la qualité de l'énergie produite et de diminuer le coût d'exploitation. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine de grande puissance grâce au développement des matériaux de construction et de l'électronique de puissance. Le pouvoir politique est aussi en grande partie moteur du développement durable.

Afin de classer la centrale et estimer sa rentabilité, nous avons entrepris une étude énergétique (puissances, rendements, économie d'énergie, temps de retour simple sur

l'investissement et indice de qualité), et comparé les résultats obtenus avec des données de références, Cela nous a permis de confirmer que, la cogénération est donc une centrale d'énergie à promouvoir qui permettra une meilleure rentabilité des énergies fossiles.

Dans la partie description et modélisation de la chaîne de conversion d'énergie thermique, nous avons décrit le principe de fonctionnement des différents éléments constituant la centrale modélisée. Ainsi, on a élaboré le modèle de régulation de pression et de vitesse de l'ensemble chaudière-turbine. Afin d'analyser l'influence des régulateurs sur le contrôle de pression de la vapeur d'eau à la sortie de la chaudière, nous avons élaboré deux types de régulation avec des régulateurs PI et PID respectivement, les résultats de simulation obtenus ont montré que l'utilisation des régulateurs PID nous a permis d'éliminer l'erreur dynamique et d'améliorer les réponses dynamiques.

Les machines électriques synchrones qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique (alternateurs) ou vice versa (moteurs synchrones) nécessitent une alimentation en courant continu ou un système d'excitation de leur inducteur. De plus, l'existence de ce dispositif permet, suivant les cas, de régler la tension ou la puissance réactive de la machine synchrone. Les performances obtenues doivent être en accord avec les conditions d'exploitation de la machine, en particulier les protections de la machine synchrone elle-même et, éventuellement, celles du réseau électrique auquel elle est reliée. Le concept de la MS3E consiste à associer dans les machines électriques synchrones, une excitation par aimants permanents, et une excitation bobinée permettant une grande souplesse de fonctionnement.

Deux cas de fonctionnement de la machine sont étudiés : Le premier cas est basé sur une étude à connexion directe au réseau électrique à vitesse fixe et excitation variable, la régulation de la vitesse est assurée par le régulateur côté turbine, le contrôle de courant d'excitation permet d'avoir une compensation totale de l'énergie réactive, et le réglage de la charge selon la consigne imposée. Le deuxième cas est une connexion indirecte au réseau à vitesse variable, dont l'excitation de MS3E est considérée constante. Une simulation de la chaîne de conversion est menée avec les deux cas de fonctionnement, les résultats de simulation ont montré que la connexion directe est plus avantageuse que celles de la connexion indirecte, elle permet un contrôle du courant d'excitation, selon le réglage de la puissance réactive et en plus, elle ne nécessite pas des convertisseurs statiques côté réseau.

En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants :

- ♣ L'étude d'autres méthodes non linéaires pour le contrôle de pression de l'ensemble chaudière-TAV ;
- ♣ La réalisation d'un système global de contrôle de la tension et de la puissance réactive, à partir de sous système.
- ♣ Etude d'une chaîne de conversion d'énergie de cogénération raccordée au réseau avec prise en compte d'autres paramètres (saturation de la machine, réseau réel, prise en compte de toutes les pertes) ;

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**A**

[Ada05] : Adam M., « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.

[Aim04]: Aimani S., « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.

[Ala01, Jea] : Alain R, Jean-Pierre D. « Différents types de chaudières industrielles » technique de l'ingénieur, traité Génie énergétique , B1480. 2001.

[And09] : André M., « Panneaux solaires thermiques », Education au Développement Durable : E.D.D., 1er juin 2009, <http://maurois-col.spip.ac-rouen.fr/spip.php?article305>

[Aou09]: Aouzellag D. and all, "Network Power Flux Control of a Wind Generator", Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 34, pp. 615-622, 2009.

B

[Bar07] : Baroudi J.A. and all, «A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators », Science Direct, Renewable Energy Journal Vol. 32, pp. 2369-2385, 2007.

[Ber09] : Bernard M., « Aérogénérateurs électriques », Ecole Normale Supérieure de Cachan - SATIE UMR CNRS-ENS Cachan 8029 Antenne de Bretagne, Equipe SETE, Master Recherche STS IST-SPEE Paris 11 – ENS Cachan 2009 Module K16

[Bru97] : Bruno B., « Les turbines », Mon petit web, enseignant des sciences physiques et informatique, Bruno Brolis, 1997-2010. <http://perso.id-net.fr/~brolis/>,

C

[Cam03] : Camblong H., « Minimisation de l'Impact des Perturbation d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

[Cap02]: Capitaneanu S.L., « Optimisation de la Fonction MLI d'un Onduleur de Tension Deux-Niveaux » Thèse de Doctorat, INPT, France, 2002.

[CSH05] : CSHPF. « Repérer et traiter les intoxications oxycarbonées ». Technical report, Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France- Groupe des experts chargé d'élaborer les référentiels de la prise en charge des intoxications oxycarbonées, 2005.

[CEA04] : Commissariat à l’Energie Atomique, «L’Hydrogène », Livret Thématique, CEA-Direction de la Communication, France, 2004.

[Che90]: Cheres E., « Small and medium size drum boiler models suitable for long term dynamic response». IEEE, 1990.

[Cab09]: « Combustion dans les Turbines à Gaz Combustion aéronautique », Master Energie, Fluide et Environnement EFE, Université et INSA de Rouen, Université du Havre.

D

[Dav01] : David W., « Les énergies fossiles »; La main à la pâte (Société française de physique), 2001, <http://www.inrp.fr/>

[Dav05] : David R., « développement de piles a combustible de type SOFC, conventionnelles et mono-chambres, en technologie planaire par SERIGRAPHIE », thèse doctorat de L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, spécialité de Génie des Procèdes, 1 juin 2005.

[Des9, Mag98] : Descombes, G., Magnet,J. « Moteurs non conventionnels, chapitre 4. Technique de l’ingénieur, BM.2593, Paris, 1998.

[Drs08] : DRESSER-RAND., « Steam Turbine Pocket Folder – French », Brochure, Siège social de la société Dresser6rand mai 2008, info@dresser-rand.com, www.dresser-rand.com

E

[EIA07] : EIA. International energy annuel 2005. Technical report, Energy Information Administration, 2007.

[EDU01]. : Projet européen EDUCOGEN. (2001). A Guide to Cogénération. 51 p. Disponibles en ligne. URL: <http://www.cogen.org/projects/educogen.htm>.

[Emi05] :Emilian K., « Machines thermiques » série mécanique et matériaux, Dunod, Paris,2005.

[Eur00] : Systèmes solaires n°140. 2000. EurObserv’ER.

F

[Fer01]: C.R. Ferguson and A.T. Kirkpatrick. Internal Combustion Engines – Applied Thermo-Sciences. John Wiley & Sons, 2001.

G

[Gér02] : Gérard S., « Systèmes énergétiques, Offre et demande d’énergie : méthode d’analyse », Golden, Colorado,USA 2002

[Gon06]: Goncalvès et Jean Paul T., « Cycles thermodynamique des machine thermiques », Institut National Polytechnique de Grenoble, Octobre 2006.

[Gom05]: Gombert C., « Simulation Temps-Réel des Dispositifs d'Electronique de Puissance Dédiés aux Réseaux d'Energie Electrique », Thèse de Doctorat, INPG, France, 2005.

[Geo07]: Geoffrey T., « Une vue d'ensemble sur la production thermique d'électricité » Article préparé par Geoffrey T et Wormell, Daniel Berry., SNC-Lavalin à Montréal, CHOC Juin 2007. Agence de l'efficacité énergétique Québec. www.aee.gouv.qc.ca.

[GIE07]: GIEC. Climate change 2007. <http://www.ipcc.ch, 2007>

[Gic06]: Gicquel R., « Echangeurs thermiques », chapitre cinq, Ecole des Mines de Paris, 2004-2006.

H

[Ham08]: Hamrouni N. and all, « New Control Strategy for 2-Stage Grid-Connected Photovoltaic System», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 2212-2221, 2008.

[Han01]: Hansen L.H. and all, « Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines», IECO'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2000-2005, December, 2001.

[Hai06]: Haizea G., « Etude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micro-réseaux », thèse doctorat, l'Institut National Polytechnique de Grenoble avec le « LABEL EUROPEEN », décembre 2006.

[Hat08]: Hattab M., « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et supercondensateurs », thèse Doctorat de l'université de Technologie Belfort Montbéliard, 4 novembre 2008.

I

[Ism00]: Ismail D et Nicolas P., « Analyse des systèmes de micro cogénération », Université catholique de Louvain, Faculté des sciences Appliquées, Département mécanique-Unité TERM, 2000-2000.

[IEPF03]: Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie., « La cogénération et la tricogénération », novembre 2003.

J

[Jea07]: Jean Claude S., « Nouvelles Technologies de l'Energie 2 : Stockage à Emission Réduite », Edition Hermès, 2007.

[Jea06] : Jean Paul T, « Cycles thermodynamiques des machines thermiques », Institut National Polytechnique de Grenoble. Octobre 2006.

[Joë08] Joël. S., « A quoi sert la cogénération » ENERPRESSE FORUM, Dalkia, 16 septembre 2008.

[Jea01] : Jean P., « Conception et calcul des chaudières : échangeurs et circuits air/fumées », Ingénieur de l'Ecole centrale des Arts et Manufactures, technique de l'ingénieur [B1 462], 20 mars 2001.

[Jea08] : Jean P., Séminaire « La cogénération à l'huile de colza », Université Libre de Bruxelles, 22 Janvier 2008. www.ef4.be.

[Jea99]: Jean Paul L., Claude B., « Commande Numérique des Machines Synchrones », Techniques d'Ingénieur, Référence D3644.

[Jon07]: John W & Sons, L., « Dynamic Force Control with Hydraulic Actuators Using Added Compliance and Displacement Compensation », Center for Fast Hybrid Testing Department of Civil Environmental and Architectural Engineering University of Colorado, Boulder, October 2008.

[Jin 08] : Jin S.& Jin H, Ji-Mo P, Sung-man P, « Auto tuning PID controller based on improved Genetic Algorithm for Reverse Osmosis plant», World academy of Science, Engineering and Technology 472008.

[Lec06] : Lecordier B., CessouA., Pasquier-Guilbert N. & Trinité M., « Couplage LIF-PIV pour l'étude de la combustion en mélange stratifié », CNRS – UNIVERSITE et INSA de Rouen, 20ème journée thématique de l'AFVL – 14 Décembre 2006

M

[Maf97]: Maffezzoni C., « Boiler-turbine dynamics in power-plant Control». Control Eng. 1997.

[Mak08] : Maker H., « optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride: association pile à Combustible et Supercondensateurs », thèse doctorat de l'université Technologie Belfort Montbéliard., 4 novembre 2008.

[Mel91]: Mello, F. P., «Boiler models for system dynamic performance studies». IEEE Trans. Power Syst. 1999.

[Mic05]: Michel P., « Conversion d'énergie par turbomachine s », Génie énergétique, ellipses 2005. www.editions-ellipses.fr

[Mic99] : Michel V., « Turbines à fluide compressible », Conception et fonctionnement, technique de l'ingénieur BM 4 562, Ingénieur de l'École centrale de Paris, 1999.

[Mir05] : Mirecki A., « Etude Comparative de Chaines de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance », Thèse de Doctorat, INPT, France, Avril 2005.

[Moh07] : Mohamed A., « Législation et conditions générales aux énergies renouvelables en Algérie » ; « Séminaire sur les Energies Renouvelables », Berlin, le 11 juillet 2007,

[Moh06] : Mohamed T., « Contribution à la modélisation et la commande des systèmes électrohydrauliques », Doctorat de l'Université Henri Poincaré-Nancy 1, 17 novembre 2006.

[Mun08] : Munteanu I. and all, « Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach », Springer-Verlag London, 2008.

[Mul04] : Multon B. et all, « Aérogénérateurs Electriques », Techniques d'Ingénieur, Référence D3960, 2004.

[Mul99] : Muljadi E. and all «Axial-Flux Modular Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind-Turbine Applications», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 4, pp. 831-836, July/August, 1999.

N

[Nah01] : Nahid M. B., « Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants: Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification en Ligne des Paramètres », Thèse de Doctorat, INPL, France, Décembre 2001.

[Ngo05] : Ngô C., «Energie d'aujourd'hui et de demain », CLEFS CEA-N°50/51 pp. 5-8, Hiver 2004-2005.

[Nas09] : Nassira A., « COGÉNÉRATION Réglementations et Perspectives » ; ecue : maîtrise de l'énergie: pile à combustible, moteur propre et cogénération ; Procédés Énergie Environnement, 2009.

[Nic08] : Nicolas P., « Analyse d'architectures, modélisation et commande de générateurs pour réseau autonomes application aux générateurs de bords d'avions », thèse doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan. Janvier 2008.

O

[Ott03] : Ottawa O., «Compresseurs et turbines», Série de la gestion de l'énergie, à l'intention des industries, commerces et institutions, Direction des économies d'énergie. Energie mine et ressources Canada. , 2003.

[Obe08] : Ober G., « Système de commande des soupapes », La thermodynamique appliquée au systèmes énergétiques, Séance S35-CDS, Ecole des Mines de Paris dernière modification 06/01/2010 www.thermoptim.org, [www.thermoptimUNIT](http://www.thermoptimUNIT.com) Séance S35_CDS commande de soupapes.htm,

P

[Poi03] : Poitiers F., « Etude et Commande de Génératrices Asynchrone pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, Décembre 2003.

[Phi07] : Philippe L., « Mécanique – Transmission de puissance », Cours magistral Mécanique, university of Angers, 2007.

R

[Rob08] : Robet R., « Machines à fluide compressible turbines et compresseurs », ARTS et METIERS ParisTech, Novembre 2008.

[Ros09]: Rostami A., Asaei Behzad., «A Novel Method for Estimating the Initial Rotor Position of PM Motors without the Position Sensor », Science Direct, Energy Conversion and Management Journal, Vol. 50, pp. 1879-1883, 2009.

S

[San08] : Sanchez J.A. and all, «Dynamic model of Wind Energy Conversion Systems with Variables Speed Synchronous Generator and Full-Size Power Converter for Large-Scale Power System Stability Studies», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 1186-1198, 2008.

[Sov04] : Sovanna P., « Moteur thermiques », système de distribution, chapitre II, 18/10/04.

[séb07] : Sébastien R., « Modélisation du comportement dynamique couple rotor-stator d'une turbine en situation accidentelle », Thèse de Doctorat, L'école centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 17 décembre 2007.

[Séb05] : Sébastien B., « Moteurs thermiques à apport de chaleur externe : étude d'un moteur STIRLING et d'un moteur ERICSSON », thèse doctorat, École Doctorale des Sciences Exactes et de leurs Applications, 22 Novembre 2005.

[Sto04] : Stouffs P., « Les moteurs à air chaud. Actes du colloque M2E « métiers de l'énergie et environnement ». Marseille, 2004.

[sét08] : Stéphane T., « Bilan énergétique et environnementaux de bâtiment à énergie positive », thèse doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des mines de paris, 21 novembre 2008.

T

[Thi10] : Thierry V., « Analyse et fonctionnement des systèmes d'énergie électricité », Notes du cours ELEC 0029, Département d'Electricité et Informatique (Institut Montefiore), janvier 2010.

[Tay06]: Taylor & Francis G., « Prime Movers», “Synchronous Generators”, 2006.

[Thi08] : Thiers S., «bilans énergétiques et environnementaux de Bâtiments à énergie positive », thèse Doctorat L'Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, 21 novembre 2008.

U

[Umb03] : Umberto D., « Bois énergie; L'utilisation du bois comme combustible pour la cogénération », Département d'ingénierie Industrielle- Université de Pérouse, N°1/2003.

W

[Wal08] : Walid H., « Gestion Optimisée de l'Énergie Électrique d'un Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible », l'Institut National Polytechnique de Toulouse, thèse doctorat, 16/12/200.

[Wen03]: Wen T., & Jihzen L, Fang G, & yanqiao C. «Tuning of PID controllers for boiler-turbine units», Department of Automation, North China Electric Power University, Zhuxinzhuan, Dewai, Beijing, 102206, People's Republic of China, 25 Avril 200.

Y

[Yve09, Ism09] : Yves L., « guide cogénération : Comment estimer la pertinence d'une installation de cogénération », Institut de Bruxelles pour la gestion de l'environnement. août 2009.

[Yve07] : Yves L., « La région Bruxelles-Capitale soutient activement la cogénération », séminaire « Présentation pour ED international », 5 novembre 2007.

[Yin08]: Ying L, Chufeng P & Zenghui Y « Steam turbine governor modeling and parameters testing for power system simulation », Higher Education Press and Springer-Verlag 2008.

NOTION DE BASE LES DIFFERENTS ELEMENTS CONSTITUANT LA CENTRALE DE COGENERATION

1. DEFINITION

L'énergie caractérise la capacité à fournir du travail, à donner du mouvement ou à élever la température. Elle se présente sous de multiples formes : mécanique, thermique, chimique, électrique, nucléaire.

Lors de la réalisation de bilans énergétiques, on distingue deux catégories d'énergie :

- ♣ **Énergie primaire** : énergie n'ayant subi aucune conversion. La production primaire d'énergie correspond à l'extraction d'énergie puisée dans la nature et, par extension, à la production de certaines énergies " dérivées " (électricité dite " primaire " qui provient de centrales hydrauliques ou nucléaires, d'origine photovoltaïque, éolienne, géothermique).
- ♣ **Énergie finale** : énergie délivrée aux consommateurs pour être convertie en énergie "utile". Exemple : électricité, essence, gaz, gazole, fioul domestique etc.

L'**énergie utile** est celle dont dispose le consommateur, après la dernière conversion à partir de ses propres équipements.

2. Analyse fonctionnelle de la centrale

2.1. Au niveau de la chaudière

Circuit fumées

- ♣ Le carburant (gaz naturel) est mélangé à l'air et injecté dans la chambre de combustion par le biais de brûleurs. Les brûleurs sont équipés de buses qui sont alimentés par un air pour assurer le meilleur mélange air-carburant. Le mélange de carburant est enflammé le gaz torches.
- ♣ **le système de mélange air-gaz**
L'air ambiant est entraîné par ventilateur à travers la gaine de ventilation. L'air est mélangé avec le combustible dans les brûleurs et entre dans le foyer, où il contribue à la combustion du carburant. La fumée génère de la vapeur et traverse la chaudière

pour chauffer le surchauffeur BT surchauffeur HT, évaporateur et économiseurs, puis envoyé dans l'atmosphère par la cheminée.

- ♣ Combustion (transformation de l'enthalpie de formation contenue dans un combustible en vapeur sous pression, à haute température il faut procéder par étapes progressives). Après préparation convenable du combustible, elle se produit grâce à des brûleurs dans un foyer ; on introduisant de l'oxygène nécessaire à cette combustion sous forme d'air, injecté dans les brûleurs et dans le foyer. Cet air est pris à l'extérieur, et pulsé vers le foyer par un ventilateur dit de soufflage.
- ♣ **Les produits de la combustion** sortent à haute température du foyer sous forme de fumées et passent à travers des échangeurs qui transfèrent leur chaleur à de la vapeur saturée pour la surchauffer dans des surchauffeurs et des resurchauffeurs et progressivement, dans la mesure où la température des fumées diminue, vers des faisceaux vaporisateurs et vers l'économiseur, pour les rejetées dans l'atmosphère par une cheminée.

Circuit vapeur

L'eau sorte de la bache à eau à 105C° puis aspiré et refoulé vers l'économiseur à l'aide des pompes

Dans le parcours du fluide chauffé et vaporisé dans la chaudière, on distingue quatre zones différentes

- ♣ **celle de l'EAU**, progressivement réchauffée dans l'économiseur, jusqu'à a une température inférieure à celle de la saturation, dans un réservoir. Une partie de l'eau est dérivée, avant son entrée dans l'économiseur, dans un circuit annexe, et injectée dans de la vapeur surchauffée à un étage intermédiaire de surchauffe, et sert ainsi au réglage de la température de la vapeur à la sortie du dernier surchauffeur. L'injection de cette eau de désurchauffe dans la vapeur se fait par pulvérisation dans un mélangeur appelé désurchauffeur.
- ♣ **celle de VAPORISATION**, où les bulles de vapeur sont générées en quantité de plus en plus grande, ce mélange d'eau et de vapeur étant appelé émulsion. l'émulsion tourne en permanence dans un circuit fermé à pression constante ; la vapeur saturée

produite est séparée de l'émulsion dans un réservoir ou un séparateur (ballon), et se trouve remplacée dans le circuit vaporisant par l'eau en provenance de l'économiseur,

- ♣ **celle de la VAPEUR SATURÉE**, qui sort du réservoir (ballon), du séparateur humide ou de l'extrémité du circuit vaporisant. Elle passe ensuite dans le surchauffeur composé en réalité de 2 échangeurs distincts, dans lesquels la vapeur s'échauffe progressivement ; la position de ces éléments dans le trajet des fumées dépend des impératifs de fonctionnement et, pour beaucoup, de nécessités de construction imposées, en particulier, par la limite des contraintes admissibles à la température du métal choisi pour les tubes. Le désurchauffeur est inséré sur le trajet de la vapeur surchauffée, en général en amont du dernier surchauffeur (SHT).

2.2. Au niveau de la turbine

En quittant la chaudière, la vapeur se dirige vers la TAV, passant par la vanne d'arrêt principale (VAP), puis par les soupapes de réglage (SR). Ou elle subit une détente isentropique à travers les différents étages constituant la TAV, à la sortie de cette dernière la vapeur surchauffée sera transformée en une vapeur saturée.

2.3. Au niveau des Evapocondenseurs

L'installation de cogénération modélisée est caractérisée par deux lignes d'évapocondenseurs chaque ligne est composée de trois évapocondenseurs branchés en série Avec un économiseur (échangeur thermique à plaque). A la sortie de la TAV, la vapeur saturée cède son énergie thermique à une eau chaude, l'échange thermique entre les deux fluides se fait en deux endroits différentes, premier lieu au niveau de l'évapocondenseurs puis au en deuxième lieu au niveau de l'économiseur, à la sortie de ce dernier, on récupère une eau chaude qui sera réutilisé à nouveau. La vapeur saturée produite sera envoyée vers le process de production industriel interne de l'usine.

3. Quelques notions sur les éléments constituant l'installation modélisée

3.1. Au niveau de la chaudière

3.1.1. Foyer

Le rôle du foyer est convertir l'énergie potentielle contenue dans le combustible (pouvoir calorifique) en gaz chauds et en rayonnement et aussi d'assurer la combustion dans des conditions correctes (figure A.1). [\[Jea01\]](#)

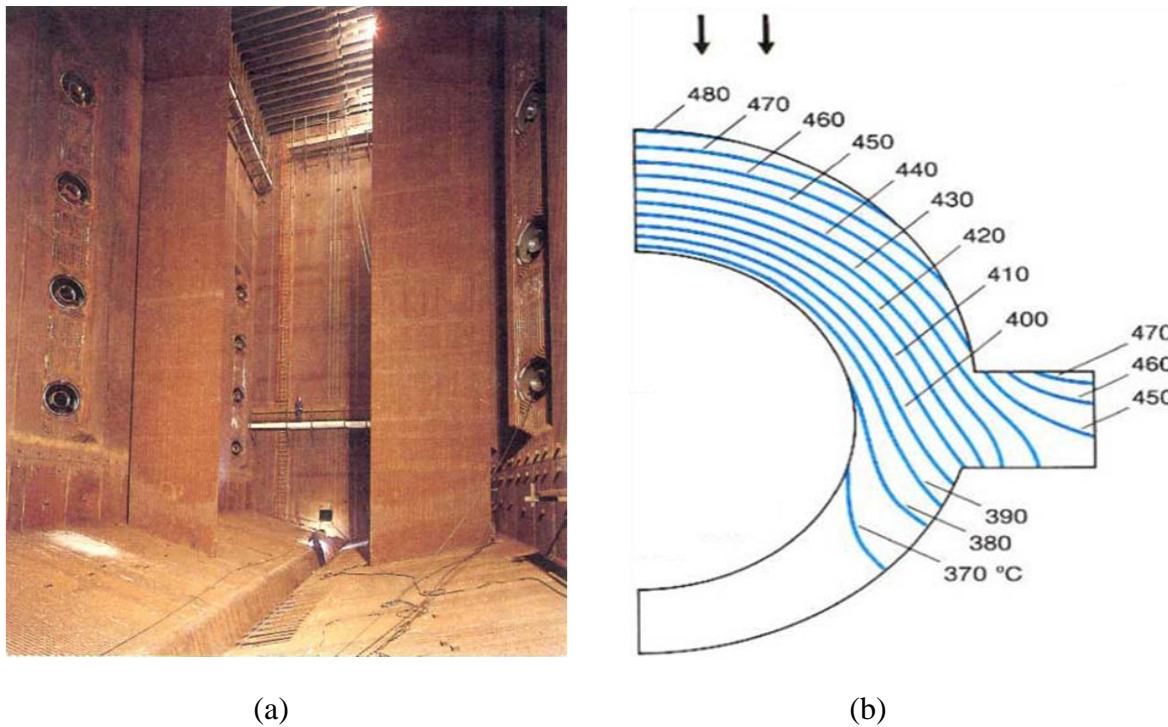


Figure A.1 : a)-vue intérieur d'un foyer garni de tubes d'eau,

b)-Evaluation de la température dans l'épaisseur d'un tube chauffé sur une face

3.1.2. Echangeurs thermique

Les échangeurs thermiques sont utilisés principalement pour transférer l'énergie contenue dans les gaz de combustion à un fluide utilisable dans un cycle thermodynamique de production d'électricité (figure A.2). [Jea01]

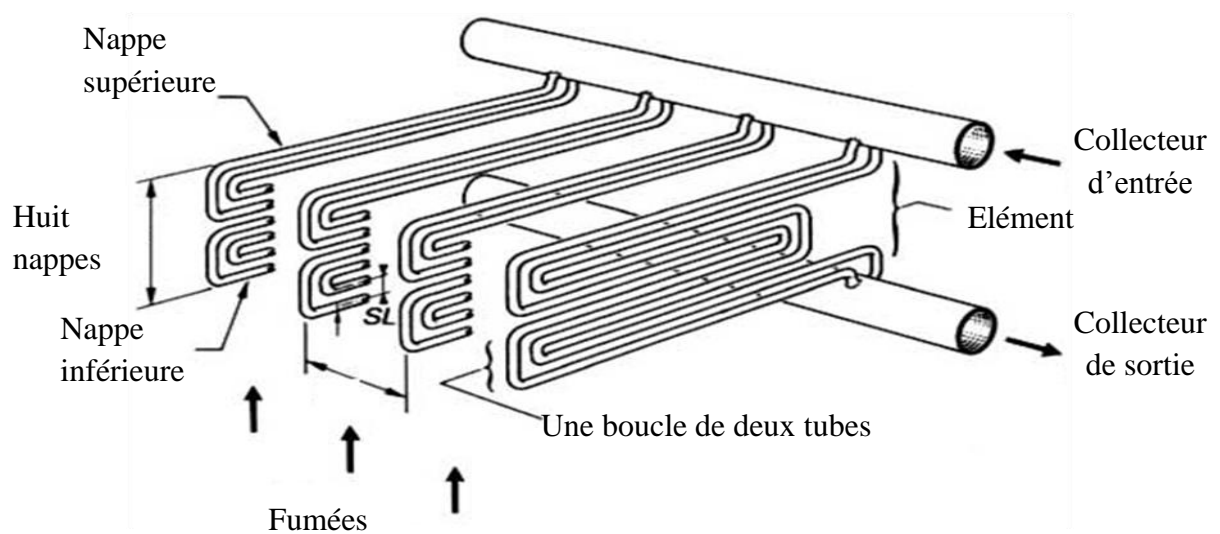


Figure A.2 : Vue cavalière d'un échangeur

3.1.3. Brûleurs

Chaque chaudière est équipée de deux brûleurs de gaz de type Ms NAB 72 Ga bas NOx. Il a pour fonction de mélanger, dans des proportions correctes, l'air comburant et le gaz pour permettre la combustion. L'alimentation en air est assurée par un ventilateur qui puise l'air ambiant de la chaufferie. L'alimentation en gaz est assurée par une électrovanne et des régulateurs de pression. Chaque brûleur est conçu pour atteindre une puissance maximale de 72MW. Chaque brûleur est monté dans un dispositif d'alimentation en air propre. Les brûleurs sont montés à deux niveaux sur la surface avant de la chaudière. Ils sont conçus de telle manière à diminuer les émissions polluantes comme CO et NOx. Idéalement lors d'une réaction de combustion, l'azote contenu dans l'air comburant, est rejeté tel quel sans être modifié. Cependant, sous certaines conditions, l'azote se combine avec l'oxygène pour former des NOx, les paramètres influençant la production de NOx sont :

- ♣ La température élevée de la flamme (supérieure à 1200C°);
- ♣ L'excès d'air, c.à.d. la présence importante d'oxygène(O2) n'ayant pas réagi dans les fumées;
- ♣ Le temps de séjour des atomes d'azote (N) dans la zone chaude de la flamme.

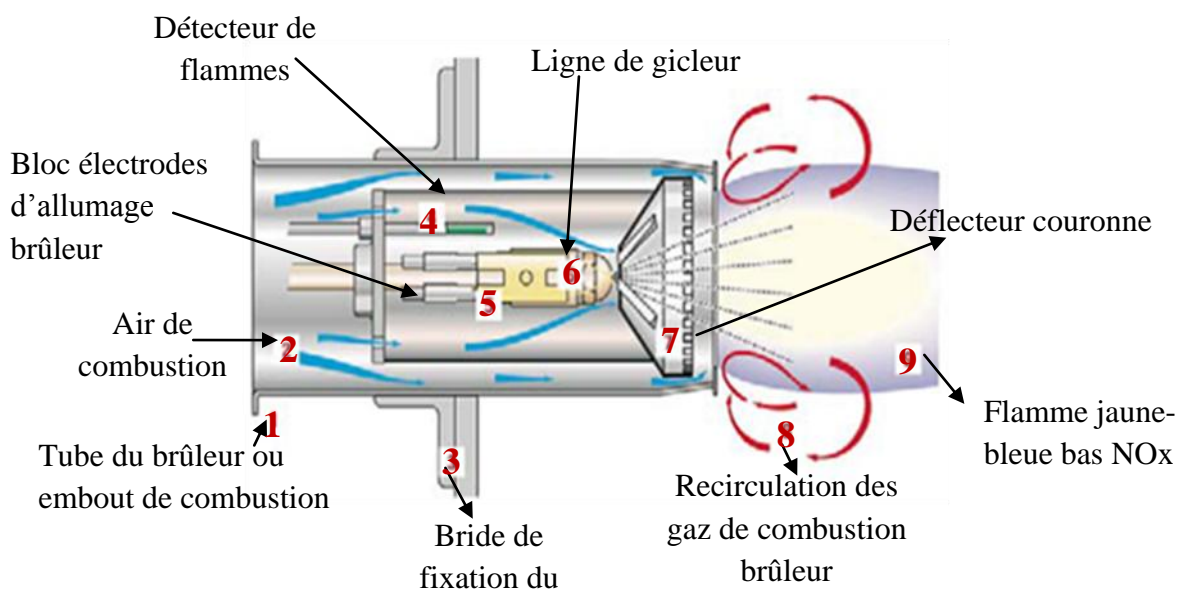


Fig.15.Tête de combustion

3.2. Au niveau de la TAV

Les applications des turbines à gaz et à vapeur sont nombreuses et variées. Elles sont justifiées par la grande puissance massique de ces machines :

- ♣ applications aéronautiques : turboréacteurs et turbomoteurs (figure A.3.a),
- ♣ application spatiale : turbopompes,
- ♣ Production électrique centralisée par unités de plusieurs centaines de MW (figure A.3.b),
- ♣ Production électrique décentralisée avec ou sans cogénération et /ou cycles combinés. [Rob08]

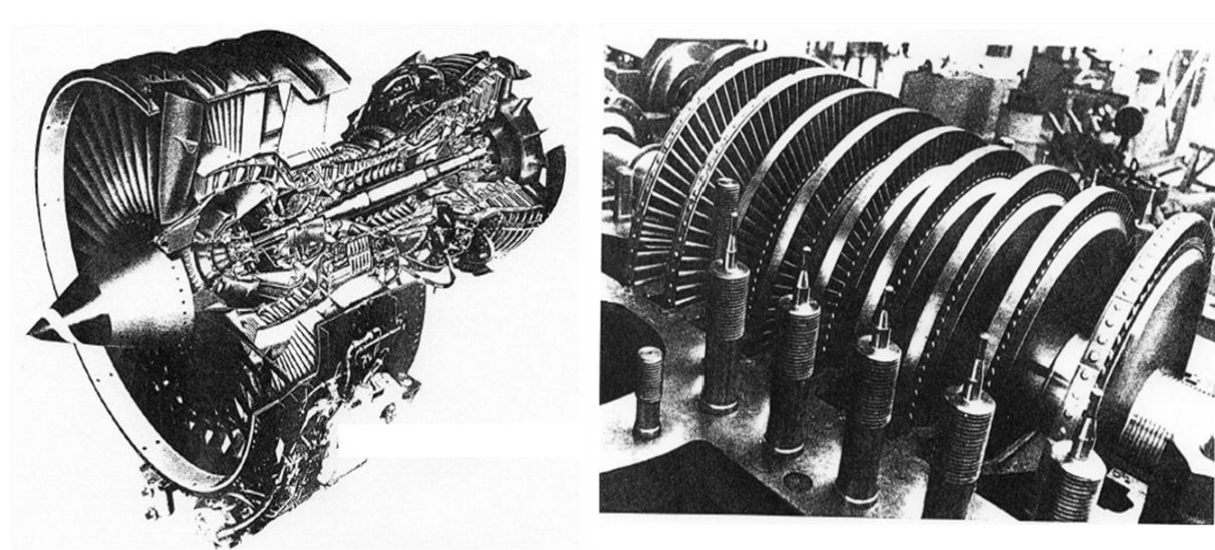


Figure A.3 :a) Turboréacteur CFM-56, [Rob08] b) Turbine à vapeur multiétages [Rob08]

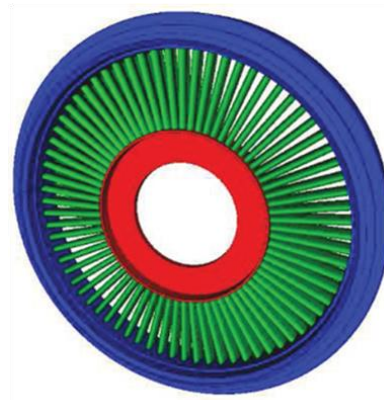
Les enjeux économiques et industriels en relation avec ces machines sont donc très importants et relèvent largement d'efforts et d'investissement multinationaux. [Rob08]

3.2.1. Diaphragme

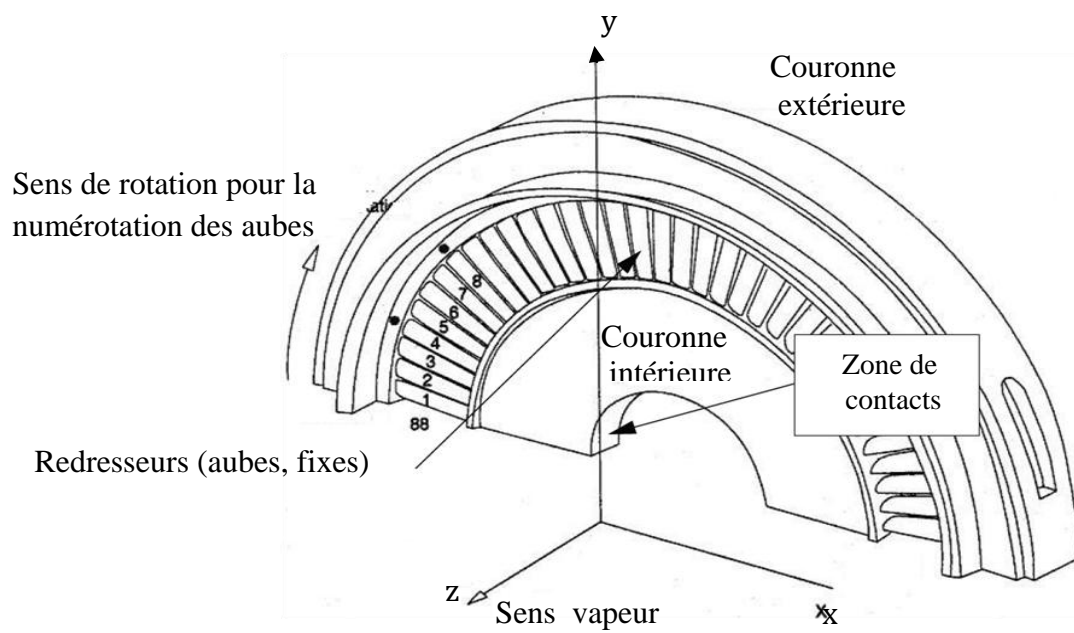
Un diaphragme de corps basse pression (figure A.4.a) a pour fonction principale le redressement du flux de vapeur dans la turbine. La figure A.4.b illustre les différents éléments qui constituent un diaphragme réel : une couronne extérieure solidaire de la table de groupe (en bleu), des ailettes de longueur maximale (en vert), dont la fonction principale est de redresser le flux de vapeur circulant dans la turbine pour en optimiser le rendement, et une couronne intérieure (en rouge) dont le rayon intérieur est choisi proche de celui du rotor pour assurer l'étanchéité. La figure (A.4.c) donne une représentation schématique d'un secteur de 180° d'un diaphragme. [Séb07]



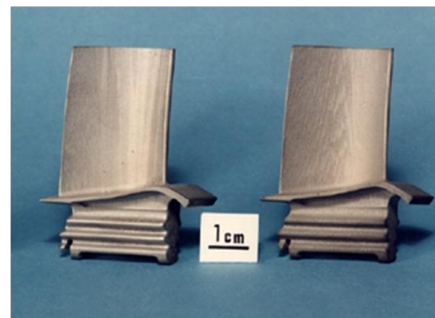
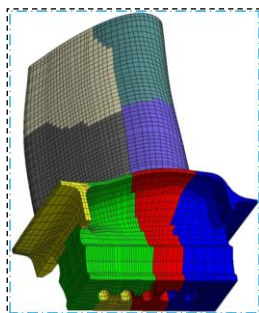
a) Diaphragme réel,



b)-Représentation schématique



c) Représentation schématique d'un secteur de 180° d'un diaphragme



d) : Aubes

Figure A.4 : Diaphragme d'un corps à pression basse

3.3. Evapocondenseurs et économiseurs

Les échangeurs de chaleur sont des appareils permettant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Dans la plupart des cas, les deux fluides ne sont pas en contact, et le transfert s'effectue à travers une surface d'échange. Au sein de la paroi séparatrice, le mécanisme de transmission de la chaleur est la conduction, et, sur chacune des deux surfaces de contact avec les fluides, ce sont presque toujours les phénomènes de convection qui prédominent [Gic06]. Les évapocondenseurs sont des échangeurs thermiques tubulaires, constitués des tubes cylindriques coaxiaux à deux passes permettent de transférer le flux de chaleur de fluide chaud au fluide froid à travers une paroi sans contact entre les deux. Il est composé de deux parties, partie condensateur et évaporateur. La première partie est consacrée pour condensée la vapeur d'eau sortante de la turbine, la deuxième partie est consacrée à l'évaporation d'eau du process raffinerie (figure A.5). L'économiseur est un échangeur compact à plaques soudées (figure A.6).



Figure A.5 : Vue intérieure de l'évapocondenseur

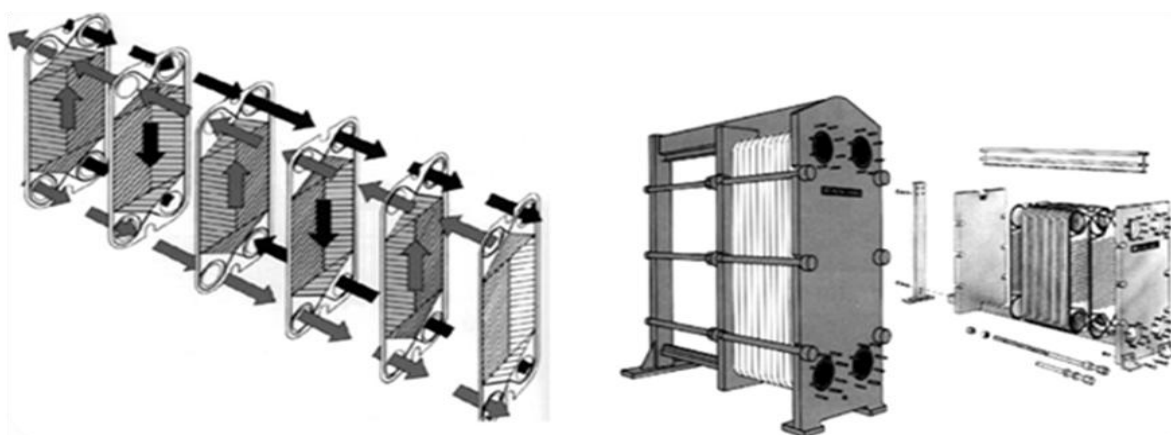


Figure A.6 : Economiseur

4. Certificat vert

Un certificat vert Octroyé pour toute production d'électricité permettant d'éviter des émissions de CO₂ avec un nombre de CV (certificat vert) proportionnel à l'économie de CO₂ réalisée, pour cela, on compare les émissions CO₂ avec les unités de référence: [Yve07]

- ♣ Electricité: rendement de référence = 55%
- ♣ Chaleur: rendement de référence= 90%

4.1. Conditions d'octroi:

- ♣ Installation certifiée par l'Etat ;
- ♣ Réaliser une économie relative de CO₂>5% (par rapport à des installations de références) ;
- ♣ Installation < 10 ans :
 - ✓ 1 CV par 217 kgCO₂ évités ;
 - ✓ Octroi durant 10 années après la mise en service ;
 - ✓ Validité du certificat vert: 5 ans.

La figure A.7, donne le mécanisme d'un certificat vert.

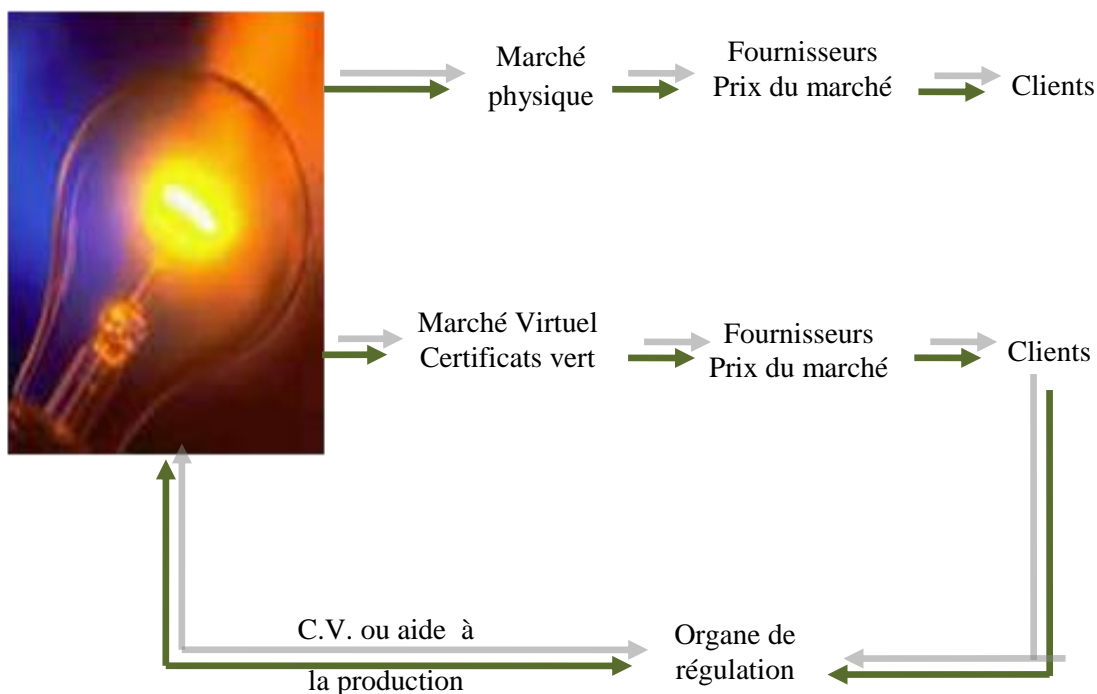


Figure A.7 : Mécanisme de certificat vert

BILAN ENERGETIQUE DE LA CENTRALE DE COGENERATION

1.1. Données des besoins du complexe agroalimentaire

Tab. B.1 : Données du la figure 1.7 (a)

	Capacité de production
Raffinerie de sucre -1600t/j	1800
Raffinerie de sucre -3000t/j	3000
Raffinerie d'huile t/j	600
Cogénération	7200

Tab. B.2 : Propriétés du gaz naturel utilisé

Composants	% du volume	PCS kj/m ³	Part PCS kj/m ³	PCI kj/m ³	Part PCI kJ/m ³	Densité relative	Part Densité relative
CH ₄	86,50	39 819	34 443	35 883	31 039	0,5550	0,4801
C ₂ H ₆	05,90	70 293	4 147	64 345	3 796	1,0480	0,0618
C ₃ H ₆	01,10	101 242	1 114	93 215	1 025	1,5550	0,0171
i-C ₄ H ₁₀	01,00	133 119	1 331	122 910	1 229	2,0860	0,0209
CO ₂	0,20	.....	.....	.....	.....	0,0031	0,0031
N ₂	05,30	.....	.....	.....	.....	0,0513	0,0513
Total	100		14 036		37 090	.....	0,6342

Tab.B.3 : Caractéristiques de la chaudière modélisée

Capacité maximale de chaudière	150 t/h
Profondeur du foyer	8900 mm
Largeur du foyer	3666 mm
Hauteur du foyer	9000 mm
Pression du foyer	10 m bar
Température de l'air de combustion	0 – 40 °C
Consommation calorifique maximale	135 MW
Plan de consommation calorifique	144 MW
Largeur du foyer	3666 mm

2. Bilan énergétique de la centrale modélisée

Tab.B.4 : Caractéristiques du gaz utilisé

Données		
Température	$T_s = 480^\circ\text{C}$	$T_{\text{am}} = 25^\circ\text{C}$
Temps de fonctionnement	$t = 8064\text{h/an}$	
PCI	37090hJ/kg	
Débit de gaz par chaudière	$\dot{m}_f = 13000\text{Nm}^3$	
Débit de vapeur produit par chaudière	$\dot{m}_{\text{vap}} = 150\text{t/h}$	

$$\dot{Q}_{\text{int}} = \dot{m}_f \cdot \text{PCI} = 7,22 * 37090 = 267,87 \text{ MW} = 964,34\text{GWh}$$

2.1. Premier cas (2,7 bar ; 130°C ; 50200 kW)

$$\dot{Q}_{\text{the}} = \dot{m}_{\text{vap}} \cdot \Delta H = \dot{m}_{\text{vap}} \cdot (H_s - H_e) = 41,66 * (2719,9 - 440,15) = 189,98 \text{ MW} = 683,93\text{GWh}$$

$$\dot{E}_{\text{ele}} = 50,2 \text{ MW} = 180,72\text{GWh}$$

2.1.1. Rapport chaleur force

$$\dot{Q}_{\text{the}} / \dot{E}_{\text{ele}} = 189,98 / 180,72 = 3,78$$

2.1.2. Rendements électrique, thermique et taux d'utilisation du combustible

$$\alpha_Q = \frac{\dot{Q}_{\text{the}}}{\dot{Q}_{\text{int}}} = \frac{683,93}{964,34} = 70,92\%$$

$$\alpha_E = \frac{\dot{E}_{\text{ele}}}{\dot{Q}_{\text{int}}} = \frac{397,58}{964,34} = 18,74\%$$

$$\alpha_{\text{tot}} = 89,66\%$$

2.1.3. Rendement exégétique

$$\alpha^{\text{ex}} = \alpha_E + \alpha_Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = 18,74 + 70,92 * \left(1 - \frac{25}{480}\right) = 85,97\%$$

2.1.4. Economie d'énergie

$$\text{EEP} = \frac{\alpha_E}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\eta_Q} - 1 = \frac{18,74}{55} + \frac{70,92}{90} - 1 = 12,87\%$$

$$EEP_{REL} = 1 - 1 / \left(\frac{\alpha_E}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\eta_Q} \right) = 1 - 1 / \left(\frac{18,74}{55} + \frac{70,92}{90} \right) = 11,4\%$$

2.1.5. Indice de qualité

$$IQ = 1 - 1 / (1,82\alpha_E + 1,11\alpha_Q) = 1 - 1 / (1,82 * 0,1874 + 1,11 * 0,7092) = 11,37\%$$

2. 1.6. Estimation de la rentabilité du projet

$$\text{Gain}_{\text{annuel net}} = \text{Gain}_{\text{éle}} + \text{Gain}_{\text{chal}} + \text{Gain}_{\text{CV}} - \text{Dépense}_{\text{comb}} - \text{Dépense}_{\text{entre}}$$

$$\text{Gain}_{\text{éle}} = \text{Prix} * \dot{E}_{\text{éle-moy}} = 2,19 \cdot 50200 \cdot 8064 = 886\,540\,032 \text{ Da/an}$$

$$\text{Gain}_{\text{chal}} = \text{Prix} * \dot{Q}_{\text{éle-moy}} = 0,096 \cdot 189,98 \cdot 8064 = 147\,071\,877,1 \text{ Da/an}$$

$$\text{Dép}_{\text{comb}} = \text{Prix} * \dot{Q}_{\text{int-moy}} = 0,095 \cdot 8064 \cdot 267\,870 = 207\,369\,953,3 \text{ Da/an}$$

$$\text{Dépense}_{\text{entre}} = 0,2 * \text{Gain}_{\text{éle}} = 886\,540\,032 \cdot 0,2 = 177\,380\,006,4$$

$$\text{Investissement}_{\text{net}} = 3\,470\,405\,407 \text{ Da}$$

$$\text{Gain}_{\text{annuel net}} = 648\,933\,949 \text{ Da/an}$$

a). Sans certificat vert

$$\text{Temps de retour simple} = \frac{3\,470\,405\,407}{648\,933\,949} = 5,35 \text{ ans}$$

b). Sans le gain sur la chaleur

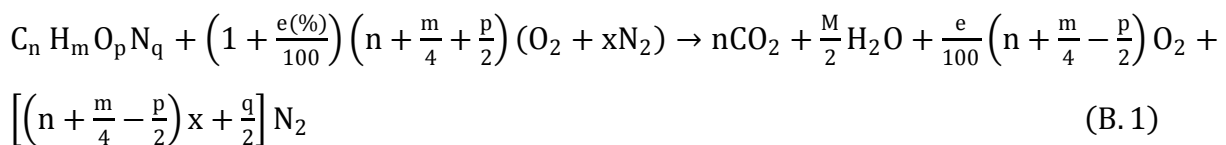
$$\text{Temps de retour simple} = \frac{3\,470\,405\,407}{501\,862\,072} = 6,92 \text{ ans}$$

3. Calcul de la combustion

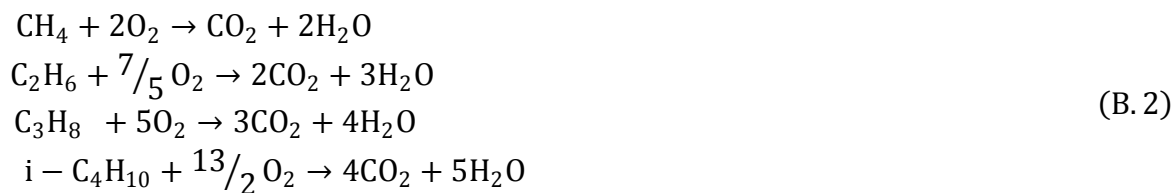
La valorisation énergétique optimale d'un combustible par voie de flamme, implique de mettre en œuvre les réactions d'oxydation les plus exothermique possible. La thermodynamique montre qu'une condition nécessaire pour obtenir ce résultat est de procéder à une oxydation complète des éléments combustibles. Cette oxydation ou combustion complète, requiert une quantité d'oxydant théorique minimale correspondant au mélange stœchiométrique. La combustion vive implique un contact intime entre les molécules de combustible et de comburant. Ainsi, la cinétique chimique qui examine les processus élémentaires menant à l'explosion et à sa propagation, fait explicitement appel aux lois statistique régissant les fréquences de collision entre espèces actives et leurs chance d'être « efficaces ».

Intuitivement, on conçoit que la probabilité de rencontre efficace-menant finalement à l'oxydation complète- sera d'autant plus grande qu'on mettra davantage de molécules d'oxydant en présence d'une molécule de réducteur (combustible). C'est pour cette raison que dans tout processus de chauffage industriel on opère avec un excès de comburant, et ce dernier ce trouve intégralement sous la forme de O_2 et N_2 dans les produits gazeux de combustion. Il s'agit d'une combustion dont le principe est appliqué dans le vaste domaine de « production de la chaleur » [Lec06]

L'équation globale de la combustion complète en présence d'un O_2+xN_2 peut ainsi s'écrire d'une manière générale :



Les différentes réactions chimiques lors du mélange gaz air sont :



3.1. Calculer les différentes quantités des composants de la combustion

3.1.1. La quantité d'oxygène nécessaire à la combustion

D'après la réaction de combustion de gaz :

$$Q_{O_2} = a. Q_{CH_4} + b. Q_{C_2H_6} + c. Q_{C_3H_8} + d. Q_{i-C_4H_{10}} \quad (B.3)$$

$$Q_{O_2} = 2,0565 \text{ kmol/kmol}_{\text{gaz}}$$

La quantité d' O_2 en tenant compte de l'excès d'air ($\alpha = 6\%$) :

$$Q_{O_2}' = Q_{O_2} + \alpha. Q_{O_2} \quad (B.4)$$

$$Q_{O_2}' = 2,0783 \text{ kmol/kmol}_{\text{gaz}}$$

3.1.2. Quantité d'air nécessaire à la combustion

Comme la teneur de l'air en O_2 est de 21%, alors la quantité d'air théorique est :

$$Q_{\text{AIRTH}} = Q_{O_2} \frac{100}{21} \quad (\text{B. 5})$$

$$Q_{\text{AIRTH}} = 2.0565 \frac{100}{21} \quad (\text{B. 6})$$

$$Q_{\text{AIRTH}} = 9,9286 \text{ kmol/kmolgaz}$$

3.1.3. La quantité pratique de l'air en tenant compte de l'excès ($\alpha=1,06\%$) :

$$Q_{\text{air}} = (1 + \alpha) \cdot Q_{\text{AIRTH}} \quad (\text{B. 7})$$

$$Q_{\text{air}} = 9,8967 \text{ kmol/kmolgaz}$$

3.1.4. Les quantités des composants dégagés de la combustion

3.1.4.1. Quantité dioxyde de carbone (CO_2) dégagé :

$$Q_{CO_2} = a \cdot Q_{CH_4} + b \cdot Q_{C_2H_6} + c \cdot Q_{C_3H_6} + d \cdot Q_{i-C_4H_{10}}$$

$$Q_{CO_2} = 0,865 + 2 \cdot (0,059) + 3 \cdot (0,011) + 4 \cdot (0,01)$$

$$Q_{CO_2} = 1,056 \text{ kmol/kmolgaz}$$

3.1.4.2. La quantité d'eau (H_2O) dégagé

$$Q_{H_2O} = a \cdot Q_{CH_4} + b \cdot Q_{C_2H_6} + c \cdot Q_{C_3H_6} + d \cdot Q_{i-C_4H_{10}}$$

$$Q_{H_2O} = 2.001 \text{ kmol/kmolgaz}$$

En tenant compte l'humidité de l'air, la quantité d'eau est alors

$$Q_{H_2O} = Q_{\text{AIRp}} \cdot \frac{P_{H_2O}}{(P - P_{H_2O})} \quad (\text{B. 8})$$

$$Q_{H_2O} = 0,3199 \text{ kmol/kmolgaz}$$

Soit l'humidité relative de l'air (45%)

$$Q_{H_2O}' = 0,1439 \text{ kmol/kmolgaz}$$

On aboutit à une quantité d'eau totale

$$Q_{H_2O\text{tot}} = Q_{H_2O} + Q_{H_2O}' \quad (\text{B. 9})$$

$$Q_{H_2O\text{tot}} = 2,1449 \text{ kmol/kmolgaz}$$

3.1.4.3. Quantité d'azote (N₂) dans l'air :

$$Q_{N_2} = 0.79 * Q_{AIRP} \quad (B. 10)$$

$$Q_{N_2} = 7,8184 \text{ kmol/kmolgaz}$$

Quantité d'azote totale ($Q_{N_{2tot}}$)

$$Q_{N_{2tot}} = Q_{N_2 \text{ air}} + Q_{N_2 \text{ gaz}} \quad (B. 11)$$

$$Q_{N_{2tot}} = 7,8714 \text{ kmol/kmolgaz}$$

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau Tab.B.5

Tab.B.5 : Caractéristiques des fumées dégagées de la combustion

Composants	MP (kg/kmol)	Quantité (kmol)	% Volume	% Masse
CO ₂	44	1,0567	8,1372	8,1372
H ₂ O	18	2,001	15,4088	15,4088
N ₂	28	7,8714	60,6140	60,6140
O ₂	32	2,057	15,84	15,84
Total		12,9861	99,9999	99,9999

PRINCIPAUX PARAMETRES UTILISES DANS LES SYSTEMES ETUDIES

C.1. Paramètres de la turbine à vapeur utilisées dans la simulation

Les principaux paramètres de la turbine à vapeur traitées dans ce travail sont donnés dans le tableau (C.1).

Tab C.1 : Paramètres de turbine à vapeur

Nature de fluide	Vapeur d'eau
Puissance	26080(kW)
Débit massique	150(t/h)
Température à l'admission	480 (C°)
Pression d'admission	54(bar)
Température à l'échappement	140(2.7bar), 200(3.7bar)
Nombre d'étage	5
Vitesse nominale	5900(tr/min)

C.2. Paramètres des MS utilisées dans la simulation

C.2.1. Paramètres de la MS3E

Les paramètres de la MS3E 25,1MW sont résumés dans le tableau (C.2).

Tab C.2 : Paramètres de la MS3E

Paramètres	
Puissance nominale (MW)	25,1 MW
$R_s(\Omega)$: Résistance d'une phase statorique	0,183
$R_r(\Omega)$: Résistance rotorique	0,222
$R_{kd}, R_{kq}(\Omega)$: Résistances amortisseurs	0,9147 – 0,6836
x_d, x'_d, x''_d (H): réactance synchrone, transitoire et subtransitoire longitudinale	2,05 – 0,157 – 0,138
x_q, x''_q (H): réactance synchrone et subtransitoire transversale	2,21 – 0,2831
T_d, T'_{d0}, T''_d (s): constantes de temps transitoire axe direct en CC et à vide, subtransitoire axe direct en CC	0,39 – 5,46 – 0,0406
T_q, T''_{q0} (s): constantes de temps subtransitoire en CC transversale et à vide longitudinale.	0,0455 – 0,307
J (kgm ²) : Inertie alternateur et excitation	2900
f (N.m.s/rad): Coefficient de frottement	29
P: Nombre de paires de pôles	2
V_n (V) : Tension nominale	11000

C.2.2. Paramètres de la MSI et MSAP

Les paramètres des MSI et MSAP 3765 et 565 kW sont résumés dans le tableau (C.3).

Tab C.3 : Paramètres des MSI et MSAP

Paramètres	Puissance nominale	
	MSI	MSAP
	3765 kW	565 kW
$R_s(\Omega)$: Résistance d'une phase statorique	0,015	0,01
$R_f(\Omega)$: Résistance rotorique	0,003	0,0021
P: Nombre de paires de pôles	12	12
$V_n(V)$: Tension nominale	1650	825

C.3. Paramètres de la chaîne de conversion raccordée au réseau électrique (chapitre III)

Les paramètres du bus continu, du filtre et du réseau sont donnés dans le tableau (C.4)

Tab C.4 : Paramètres de la chaîne de conversion raccordée au réseau électrique

	Paramètres	Valeur numérique
Bus Continu	Capacité (F)	0,0137
	Tension (V)	30000
Filtre	Résistance (Ω)	0,01
	Inductance (H)	0,012
Réseau	Tension simple efficace (V)	11000
	Fréquence (Hz)	50

C.4. Calcul des régulateurs PI

C.4.1. Structure du régulateur

La fonction de transfert d'un régulateur PI classique est donnée par l'expression suivante :

$$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (C.1)$$

K_p : Gain proportionnel du correcteur ;

K_i : Gain intégral du correcteur (s est l'opérateur de Laplace).

L'expression (A-1) peut se mettre aussi sous la forme suivante :

$$C(s) = K_p \frac{1+T_i s}{T_i s} \quad (C.2)$$

Tel que : $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ est la constante de temps du régulateur

Le schéma bloc du correcteur PI correspondant aux deux expressions (C.1) et (C.2) est donné sur la figure (C-1).

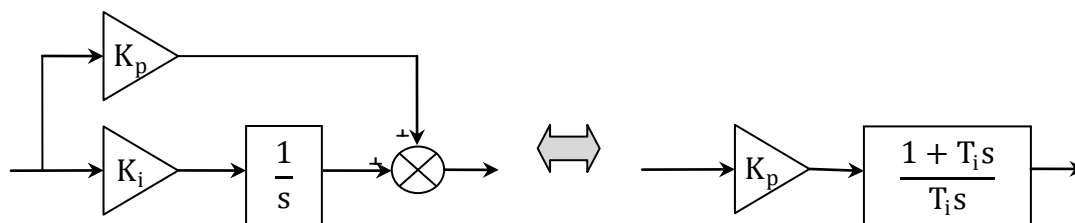


Figure C.1 : Schéma bloc d'un régulateur PI

C.4.2. Calcul des paramètres

On considère un processus dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(s) = \frac{k}{1+\tau s} \quad (C.3)$$

Tel que : k est le gain statique, τ est la constante de temps du processus.

La régulation du processus en utilisant un correcteur PI est présentée par la figure (C.2).

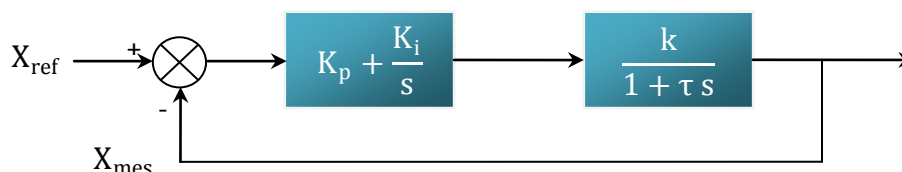


Figure C.2 : Schéma bloc d'un régulateur PI

Afin de calculer les régulateurs de vitesse, on a considéré une fonction de transfert de second ordre. En effet, la fonction de transfert en boucle fermée relative au schéma de la figure (A.2) est exprimé par :

$$H(s) = \frac{1 + T_i s}{1 + T_i \frac{1 + kK_p}{kK_p} s + \frac{T_i \tau}{kK_p} s^2}$$

Le dominateur de la fonction de transfert $H(s)$ (de second ordre) est de la forme :

$$D(s) = 1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2 \quad (C.5)$$

Tel que : ζ est le coefficient d'amortissement, ω_n est la pulsation propre.

$$\begin{cases} K_i = \frac{\tau \omega_n^2}{k} \\ K_p = \frac{2\zeta K_i}{\omega_n} - \frac{1}{k} \end{cases} \quad (C.6)$$

Les paramètres ζ et ω_n sont choisis pour avoir une réponse stable, rapide et précise, en effet :

Pour $\zeta = 0,7$, on a $t_r \omega_n = 3$ (t_r est le temps de réponse choisi), alors $\omega_n = t_r/3$.

Pour le calcul des autres régulateurs, on a considéré une fonction de transfert en boucle fermée du premier ordre qui s'exprime par :

$$F(s) = \frac{1}{1+T_f s} \quad (C.7)$$

D'autre part :

$$F(s) = \frac{C(s) G(s)}{1+C(s) G(s)} \quad (C.8)$$

On en déduit alors l'expression de $C(s)$ qui s'identifie à un régulateur PI :

$$C(s) = \frac{1+\tau s}{k T_f s} = \frac{\tau}{k T_f} \frac{1+\tau s}{\tau s} \quad (C.9)$$

En comparant les expressions (C.2) et (C.9), on déduit :

$$\begin{cases} T_i = \tau \\ K_p = \frac{\tau}{k T_f} \end{cases} \quad (C.10)$$

Les paramètres des régulateurs utilisés dans ce travail sont résumés dans le tableau (C.4, 5 et 6).

Tab C.4 : Paramètres des régulateurs PI côté chaudière

Objectif de correcteur	K_v, C_B, K_{SH}, R	$T_i(T_0, T_1, T_b)$
Paramètre de la chaudière	5 – 0,1 – 0,09 – 10	12 – 15 – 2,5
Asservissement de pression de la chaudière	19,5 – 0,2 – 0,2-5	2,5

Tab C.5 : Paramètres des régulateurs PI côté turbine

Objectif de correcteur	Asservissement de charge de la turbine	Asservissement de vitesse de la turbine
$K_i(K_p, K_d)-K_2, K_1$	5 – 21	0,02 – 0,2
$T_i(T_d, T_r)-(T_e, T_s)$	2,5 – 2,1	0,5 – 0,2

Tab C.6 : Paramètres des régulateurs PI côté MS3E

Objectif de correcteur	K_i	T_i
Régulation de vitesse de la MS3E	5000	0,7399
Régulation de la tension du bus continu	10	0,01 – 0,05
Régulation des courants envoyés au réseau électrique	100	0,001

Objectif de correcteur	
$K_i(K_p, K_d)-K_2, K_1$	5 – 21 0,02 – 0,2
$T_i(T_d, T_r)-(T_e, T_s)$	2,5 – 2,1 0,5 – 0,2

RESUME

Dans cette recherche, nous avons étudié le fonctionnement d'une centrale de cogénération basé sur une TAV couplée à une MS3E. Nous avons abordé la problématique de la pollution issue de la combustion, ainsi que le contrôle de la puissance générée par la turbine à vapeur dans une chaîne de conversion d'énergie raccordée au réseau électrique. Le premier chapitre représente les principales technologies de la cogénération résultant des différentes combinaisons entre machines thermiques d'une part, et une étude énergétique de la centrale modélisée, d'une autre part. Le deuxième chapitre aborde le contrôle de pression, la vitesse et puissance de l'ensemble chaudière-turbine à vapeur, à une vitesse variable et constante. Le troisième chapitre illustre le comportement dynamique d'une TAV connectée au réseau électrique, ainsi que sa commande. Deux modes de fonctionnements sont considérés ; contrôle de puissance avec une connexion directe au réseau électrique. L'optimisation de puissance est réalisée par une commande du hacheur à partir de la régulation du courant d'excitation à la sortie de la machine, et le courant d'excitation calculé à partir de la puissance réactive. Le second cas est le contrôle de puissance avec une connexion indirecte au réseau électrique.

MOTS CLES : *turbine vapeur à vitesse variable et constante, MS3E, MSI, MSAP, contrôle de puissance, connexion au réseau électrique.*

ABSTRACT

In this work, we studied the operation of a cogeneration plant based on a steam turbine coupled with MS3E. We addressed the problem of pollution from the combustion and control of the power generated by the steam turbine in a chain of energy conversion connected to the mains. The first chapter introduces the main cogeneration technologies resulting from different combinations of heat engines and energy study of the plant modeled. The second chapter discusses the control of pressure, speed and power of the boiler-steam turbine with variable speed and constant speed. The third chapter illustrates the dynamic behavior of steam turbine mains electricity and its control. Two operating modes are considered; power control with a direct connection to the grid. The power optimization is performed by a chopper control from the control of the excitation current to the output of the machine, and the excitation current calculated from the reactive power. The second case is the power control with an indirect connection to the grid.

KEY WORDS: *steam turbine at constant speed and variable MS3E, MSI, MSAP, power control, electrical connection.*