

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA- Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle
Mémoire de fin de cycle

*En vue l'Obtention du Diplôme Master en Electrotechnique
Option : Electromécanique*

Thème

**Etude et commande d'un système
hydraulique à vitesse variable**

Présenté par :

Mr. HACHEMI Tarik

Mr. DJERBI Lyes

Encadreur :

Mr. GHEDAMSI Kaci

Promotion - 2017

Remerciements

Nous tenons à remercier

Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et la patience pour mener a terme ce modeste travail.

Nous remercions nos familles qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toutes nos études.

*Nous adressons notre reconnaissance et nos remerciements à notre promoteur
Mr. GHEDAMSI Kaci*

Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de juger notre travail.

Notre sincère gratitude va vers tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents qui m'ont aidé et soutenu durant toutes ces longues années d'étude.

A ma grand-mère na Saliha

A mon binôme Tarik

A mon frère

A tous mes amis :



LYES

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents qui m'ont aidé et soutenu durant toutes ces longues années d'étude.

A mes frères et mes sœurs

A mon binôme Lyes

A tous mes amis :



NOM	Symbole	Unité
Roue de la turbine	Ra	M
jet d'eau	J_t	-
auget ou aube profilée	Aug	-
injecteur	Inj	-
débit	Q	m ³ / s
chute nette	H	m
énergie massique	E	J / kg
vitesse de l'eau du jet	C	m / s
couple sur l'arbre de la turbine	T	Nm
vitesse de rotation	W	rad / s
rayon de la roue tangent au jet	R	m
vitesse périphérique de la roue à l'auget	U	m / s
force hydrodynamique du jet sur l'auget	F_h	N
canal à tourbillon	Bsp	-
roue à palettes	Rap	-
Vitesse périphérique de l'aubage à l'entrée de la roue	U_1	m/s
Composante périphérique de la vitesse absolue V de l'eau à l'entrée de la roue	V_{1u}	m/s
Vitesse de l'aubage à la sortie de la roue, dite vitesse d'entraînement	U_2	m/s
composante périphérique de la vitesse absolue V de l'eau à la sortie de la roue	V_{2u}	m/s
vitesse absolue de l'eau dans la machine.	V	m/s
Densité volumique de l'eau	ρ	Kg/m ³
Rendement	η	%
inductance quadratique	L_q	Henry
puissance mécanique	P_{mec}	Joule
nombre de paire de pole	P	-

NOM	Symbole	Unité
maximum susceptible d'être turbiné par la	Q_w	m ³ /s
la pression du fluide en entrée	P_1	Pa
la pression du fluide en sortie	P_2	Pa
l'altitude de sortie centrale	z_1	m
l'altitude de l'entrée centrale	z_2	m
l'accélération de la pesanteur	g	m/s ²
Energie Hydraulique	W_h	Joule
Position des directrices	G	-
Vitesse de rotation	ω	tr/min
La hauteur de chute	H	m
Vitesse	V	m/s
Puissance mécanique a la sortie de la turbine	P_m	W
Vitesse initiale	V_0	m/s
Position initiale des directrices	G_0	-
Longueur de la conduite	L	m
Section de la conduite	A	m ²
La constante de temps hydraulique	T_w	[s]
vitesse initiale de l'eau dans la conduite forcée	u_0	m/s
Hauteur de chute initiale	h_0	m
le gain proportionnel	K_c	s ⁻¹
le gain intégral	K_i	s ⁻¹
le statisme	R	s
le gain de la valve pilote	K_v	s ⁻¹
la constante de temps de la valve pilote	T_p	s
le gain proportionnel de la valve pilote	K_p	s
le gain intégral de la valve pilote	K_i	s ⁻¹
la constante de temps mécanique	T_m	s
le débit volumique d'eau	Q_v	m ³ /s
le volume d'eau	V	m ³
la vitesse de l'eau	v	m/s
la section du tuyau	s	m

la hauteur de l'eau au refoulement	H_r	m
la pression au refoulement	P_r	Pa
la hauteur d'eau à l'aspiration	H_a	m
la pression à l'aspiration	P_a	pa
la hauteur de l'eau au refoulement	H_r	m
la pression au refoulement;	P_r	Pa
puissance utile	P_{u_pompe}	W
puissance électrique consommée par la pompe	P_{e_pompe}	W
rendement du pompage	η_{pompe}	-
la hauteur manométrique	H_{mt}	m
Hauteur à convaincre par la pompe	H_g	m
Les pertes de charges dans les canalisations	P_c	-
Coefficient de régulation de la pression dans la canalisation	λ	-
Coefficient des pertes de pression locales dans les différentes connexions de a canalisation	ξ	-
Puissance nominale du moteur synchrone	P_n	W
Vitesse nominale du moteur synchrone	ω_n	rad/s
Vitesse du moteur du moteur synchrone	ω	rad/s
Couple résistant	C_r	N.m
tensions de phases statoriques	v_{abc}	V
courants des phases statoriques	i_{abc}	A
les flux totaux produits par les courants statoriques.	φ_{abc}	Wb
La résistance d'une phase statorique	R	Ω
La tension d'excitation	v_f	V
Résistante équivalant des aimants	R_f	Ω
le flux crée par les aimants	φ_f	Wb
inductances propres statorique	L_s	H
la matrice à coefficients constants	L_{s0}	H
l'inertie totale des parties tournante	J	-
le couple de charge	C_m	N.m
le couple électromagnétique de la machine	C_{em}	N.m

la vitesse mécanique du rotor inductance directe	Ω L_d	Tr/min H
-----------------------------------------------------	-------------------	-------------

LISTE DES FIGURES

FIGURE I.1. CAPACITES DES DIFFERENTS MOYENS DE STOCKAGE.....	10
FIGURE I.2. REPARTITION DES PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS.....	12
FIGURE I.3. EVOLUTION DES CAPACITES HYDROELECTRIQUES MONDIALES	13
FIGURE I.5. CENTRALE DE REVIN	17
FIGURE II.1. DESCRIPTION GENERALE DU SYSTEME	20
FIGURE II.2. PRINCIPE DU POMPAGE-TURBINAGE	21
FIGURE II.3 SCHEMA D'UNE TURBINE A ACTION AVEC SES PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT	25
FIGURE II.4. IMAGE SCHEMATIQUE D'UNE TURBINE A REACTION.....	27
FIGURE II.5. TURBINE FRANCIS	29
FIGURE II.6. SCHEMA REPRESENTATIF DE LA TURBINE FRANCIS.....	30
FIGURE II.7. TRIANGLE DE VITESSE A L'ENTREE ET A LA SORTIE DU ROTOR D'UNE TURBINE FRANCIS	31
FIGURE II.8. DIFFERENTES ARCHITECTURES DE GROUPES DE POMPAGE- TURBINAGE.....	34
FIGURE. II.9 : DIFFERENTS INDUCTEURS ET TYPES DE BOBINAGE DES MS	38

FIGURE II.10. INTERETS DE LA VITESSE VARIABLE POUR LES TURBINES HYDRAULIQUES.....	39
FIGURE III.1. DIAGRAMME REPRESENTATIF DE LA MICROCENTRALE ETUDIEE	42
FIGURE III.2. CONFIGURATION DU GENERATEUR CONNECTE AU RESEAU	42
FIGURE III.4. CENTRALE HYDROELECTRIQUE (UNE SEULE DIRECTRICE REPRESENTEE.....	44
FIGURE III.5. MODELE COLONNE D'EAU ET TURBINE	46
FIGURE III.6. DIAGRAMME DU FONCTIONNEMENT DE REGULATEUR DE VITESSE PROPORTIONNEL INTEGRAL (PI).....	48
FIGURE III.7. BLOC DIAGRAMME DECRIVANT L'ENSEMBLE DU PROCESSUS REGULATION DU MODELE TURBINAGE.....	49
FIGURE III.8. PUISSANCE DE TURBINAGE DE SORTIE SUIVANT LA PUISSANCE D'ENTREE DEMANDE	49
FIGURE III.9. SCHEMA D'UNE STATION DE POMPAGE.....	51
FIGURE III-9 : LA VARIATION DE LA VITESSE A L'ENTREE DE LA POMPE.....	55
FIGURE III-10 : PUISSANCE A L'ENTREE ET A LA SORTIE DE LA POMPE	56
FIGURE III-11 : REPRESENTATION DE LA MACHINE SYNCHRONE DANS LE REFERENTIEL A,B,C ET REFERENTIEL D,Q	58
FIGURE III.12 : MACHINE EQUIVALENTE AU SENS DE PARK	60
FIGURE III-13 : DECOUPLAGE DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS	66

FIGURE III-14 : COMPORTEMENT DE LA MACHINE SYNCHRONE AVEC DECOUPLAGE	66
FIGURE III-15 : BOUCLE DE COMMANDE.....	67
FIGURE III-16 : PUISSANCE A L'ENTREE ET A LA SORTIE DE LA MSAP.....	67
FIGURE III-17 : ALLURE DES COURANTS ET TENSION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT.	68
FIGURE III-18 : AGRENDISSEMENT SUR LES TENSIONS ET COURANTS EN MODE MOTEUR.	68
FIGURE III-20 : AGRENDISSEMENT SUR LES TENSIONS ET COURANTS AU MOMENT DE LA TRANSITION ENTRE LE MODE MOTEUR ET LE MODE GENERATRICE.	69
FIGURE I.1.DESCRPTION GENERALE DU SYSTEME.....	71
FIGURE IV.2. SCHEMA GLOBALE DE LA CENTRALE DE POMPAGE TURBINAGE A VITESSE VARIABLE IMPLEMENTE SOUS MATLAB /SIMULINK	73
FIGURE IV.3 : ALLURES DES PUISSANCES (DE REFERENCE, DE POMPEE OU DE TURBINEE).....	74
FIGURE IV.4 : ALLURES DE LA TENSION ET DU COURANT DE LA PREMIERE PHASE DE LA MACHINE.....	75

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Etat de l'art sur l'hydroélectricité.....	3
I.1. Introduction	3
I.2. Etat de l'art	3
I.3. Le stockage de l'énergie électrique	4
I.4. L'hydroélectricité dans le monde	5
I.4.1. La production d'hydroélectricité	6
I.4.2. La capacité installée.....	7
I.5. Les STEP dans le monde.....	8
I.5.1. Quelques exemples de STEP dans le monde.....	10
I.6. Conclusion.....	14
Chapitre II : Description de la centrale hydraulique	15
II.1. Introduction.....	15
II.2.1. Vue globale sur le système de stockage turbinage	16
II.2.2. Définition d'une petite centrale hydraulique.....	17
II.2.3. Ressources et applications.....	17
II.2.4. Classification	18
II.2.5. Les avantages de la petite hydraulique.....	19
II.3. Les différents types de turbines	19
II.3.1. Turbine à action.....	20
II.3.1.1 Principe de fonctionnement.....	20
II.3.1.2. Types de turbines à action	21
II.3.2. Turbines à réaction	21
II.3.2.1. Principe de fonctionnement.....	21
II.3.2.2. Types de turbine à réaction	23
II.3.2.3. Turbine Francis	23
II.3.2.3.1 Les éléments de construction	24
3.2.3.1. Triangle de vitesse	25
II.4. Les grandeurs caractéristiques des Petites Centrales Hydroélectrique(PCH).....	26

Sommaire

II.5. Equation de Bernoulli	27
II.6. Solutions techniques	28
II.6.1. Trois solutions techniques	28
II.6.2. Avantages des diverses solutions techniques	29
II .7. Les génératrices	30
II.8. Machines synchrones à aimants permanents	30
II.9. Petite centrale hydraulique (Vitesse fixe et Vitesse variable)	33
II.10. Structure retenue dans le cadre de notre travail	34
II.11. Conclusion	34
Chapitre III : Modélisation et simulation des différentes parties de la centrale	35
III.1.Introduction	35
III.2.Description de la station de pompage turbinage étudiée	35
III.3.1.Régulation du mode turbinage.....	37
III.3.2.Modélisation de la turbine hydraulique (turbine Francis).....	37
III.3.2.1.Hypothèses de la modélisation « petits signaux» de la centrale	38
III.3.3.Les équations de la turbine	39
III.3.4.Régulateur PI et système de commande	41
III.3.5.Réglages du régulateur de vitesse proportionnel intégral (PI).....	42
III.3.6. Application à nos travaux	43
III.3.7. Résultats	44
III.4. Modèle de la station de pompage	45
III.4.1. Construction de modèle	45
III.4.2. Caractéristiques générales des pompes:.....	45
III.4.3. Modélisation de la pompe centrifuge.....	48
III.4.4. Application.....	49
III.4.5. Résultats	49
III.5 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	50
III.5.1. Hypothèses simplificatrices	51
III.5.2. Modèle dans un référentiel (a,b,c)	51
III.5.3. Equation des flux magnétiques	53
III.5.4. Equation mécanique.....	54
III.5.5. Transformation de Park.....	54
III.5.6. Matrice de Park et relations de passage	55
III.5.7. Equation de la machine dans le repère de Park.....	55
III.5.8. Modèle d'état de la machine synchrone à aimant permanents.....	57
III.5.9.Principe de la commande vectorielle de la machine synchrone.....	58

Sommaire

III.5.10. Simulation de la machine synchrone à aimant permanent avec la commande vectorielle.....	61
III.5.10.1. Résultats.....	61
III.5.11. Interprétation des résultats :.....	63
III.6. Conclusion.....	63
Chapitre IV : Principe de stockage de l'énergie par pompage-turbinage...	64
IV.1. Introduction.....	64
IV.2. Système de stockage turbinage.....	66
IV.3. Résultats de simulation et interprétation.....	67
IV.4. Conclusion.....	69
CONCLUSION GENERALE	69

Introduction générale

Introduction générale

Après les restrictions environnementales annoncées en chaque sommet de l'ONU depuis maintenant une quinzaine d'année les pays industriels se sont tournés vers une production d'électricité de plus en plus à base des énergies renouvelable [TOU], [Jun04]. Cet intérêt majeur pour les énergies renouvelable a ouvert des portes pour les chercheurs d'explorer différentes possibilités d'exploitation et proposer plusieurs topologies de connexion pour améliorer leurs rendement et leurs flexibilité [Bel 13], [Jun 04], [Bre 08], [Pac-B], [Goud].

Dans notre travail nous allons explorer l'énergie hydraulique qui est aussi une énergierenouvelable mais pas pour la génération d'énergie mais plutôt comme moyen de stockage. Ceci dans le but de pallier à l'inconvénient du caractère aléatoire et intermittent des sources d'origine renouvelable par le lissage de puissance. Cette approche permettra d'augmenter le taux d'intégration de ce type d'énergie surtout pour les sites isolés.

Le pompage hydraulique est fréquemment retrouvé dans la littérature contrairement au turbinage. Les ancienne stations sont à vitesse fixe d'où une contrainte importante qui limite les possibilités topologiques proposer mais avec l'évolution de l'électronique de puissance qui offre une flexibilité au niveau des convertisseurs statiques a des rendement près de l'unité une solution très intéressante s'offre à nous et qui reste encore peut explorer qui est la vitesse variable.

Le système proposée dans notre travail est une petite centrale de pompage turbinage qui est constitué de deux bassin d'eau une conduite forcée une pompe turbine réversible une machine électrique réversible ainsi qu'une interface d'électronique de puissance. Cette centrale hydroélectrique à vitesse variable servira de moyen intermédiaire de stockage pour une source d'énergie renouvelable caractériser par une intermittence et qui sera couplée soit au réseau de distribution soit à une charge isolée.

Le mémoire est subdivisé en quatre chapitres, le premier chapitre est un bref état de l'art et la situation de l'énergiehydraulique dans le monde d'une manière générale un aperçu sur les technique de stockages et est achevé par quelque exemples de stations déjà existantes.

Le deuxième chapitre traitera des technologies de la petite centrale hydroélectrique, une définition suivie d'une description est donnée pour chaque composante ainsi que les solutions

Introduction générale

technique envisageable, la structure retenue dans le cadre de ce mémoire vient clôturer ce chapitre.

Le troisième chapitre portera sur la modélisation mathématique et la simulation numérique, sous l'environnement Matlab/Simulink, du comportement dynamique de chacune des parties principale de la station (turbine, pompe et machine synchrone à aimants permanents).

Le dernier chapitre sera voué au comportement dynamique global de la station, par simulation sous Matlab/Simulink, ce chapitre nous a permis d'ouvrir des perspectives pour poursuivre des travaux sur le sujet.

Le mémoire se terminera par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I : Etat de l'art sur l'hydroélectricité

I.1. Introduction

Les systèmes de production d'énergie renouvelable sont très explorés du fait d'un intérêt majeur lié au développement durable. Ces systèmes comme le solaire photovoltaïque, l'éolien voire l'hydrolienne (qui ne faut pas confondre avec l'hydraulique classique) sont plus ou moins intermittents mais ne posent pas de problèmes majeurs en termes de commande. Il s'agit plutôt d'améliorer leur intégration au réseau techniquement et économiquement. En particulier dans le cas des réseaux faibles ou isolés, le contrôle des flux globaux à des fins de lissage, de qualité d'énergie, de contrôle de tension ou encore de services systèmes passe par des solutions de stockage ou de pilotage de charges [Bel 13].

Face au défi environnemental et climatique qui impose impérativement de réduire drastiquement les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, CO₂ pour l'essentiel, depuis le milieu du 21^e siècle, presque tous les pays industrialisés, mais également les pays émergents, se sont engagés dans la transition énergétique [Tou].

L'énergie est au cœur de notre civilisation. Le charbon d'abord, le pétrole ensuite, puis le gaz, l'hydraulique et l'électricité ont permis à nos sociétés de se développer et de continuer à exister. Il n'existe pas de modèle de développement sans recours à l'énergie [Jun 04].

I.2. Etat de l'art

L'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable basée sur le cycle naturel de l'eau. Elle est considérée comme la plus mature, la plus fiable et la plus rentable technologie de production d'énergie renouvelable disponible.

La petite hydraulique où la puissance est généralement inférieure à 10MW, a un potentiel énorme dans le monde entier, ce qui lui permettrait une contribution significative aux besoins énergétiques futurs. Dans le nouveau contexte du marché d'électricité, cette technologie représente une bonne solution en termes de coût et d'impact environnemental. Comme la principale ressource est continue et prévisible, ces systèmes peuvent constituer la base de futurs micro-réseaux en particulier dans les sites isolés. Dans le nouveau contexte du marché

d'électricité, cette technologie représente une bonne solution en termes de coût et d'impact environnemental [Bel 13].

I.3. Le stockage de l'énergie électrique

Le stockage direct de l'énergie électrique est une opération difficile surtout pour un stockage à grande échelle. Il convient donc de la transformer en une autre forme d'énergie plus facilement stockable.

De multiples moyens de stockage sont disponibles. Qu'il soit mécanique (stockage potentiel ou cinétique), chimique (hydrogène), électrochimique (batteries), thermique (stockage de froid ou de chaud), chaque mode de stockage industriel présente ses avantages et ses inconvénients (figure I.1). Le choix technologique doit être adapté à chaque usage particulier et prendre en compte le degré de maturité de la technologie et de l'ensemble des coûts réels qui lui sont associés.

Stocker l'énergie électrique en élevant l'énergie potentielle d'un volume d'eau est actuellement la solution la plus mature pour répondre aux besoins massifs du système électrique. C'est la raison pour laquelle ce sont les barrages et les Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP) qui représentent à ce jour la quasi-totalité de la puissance de stockage installée dans le monde [Tou].

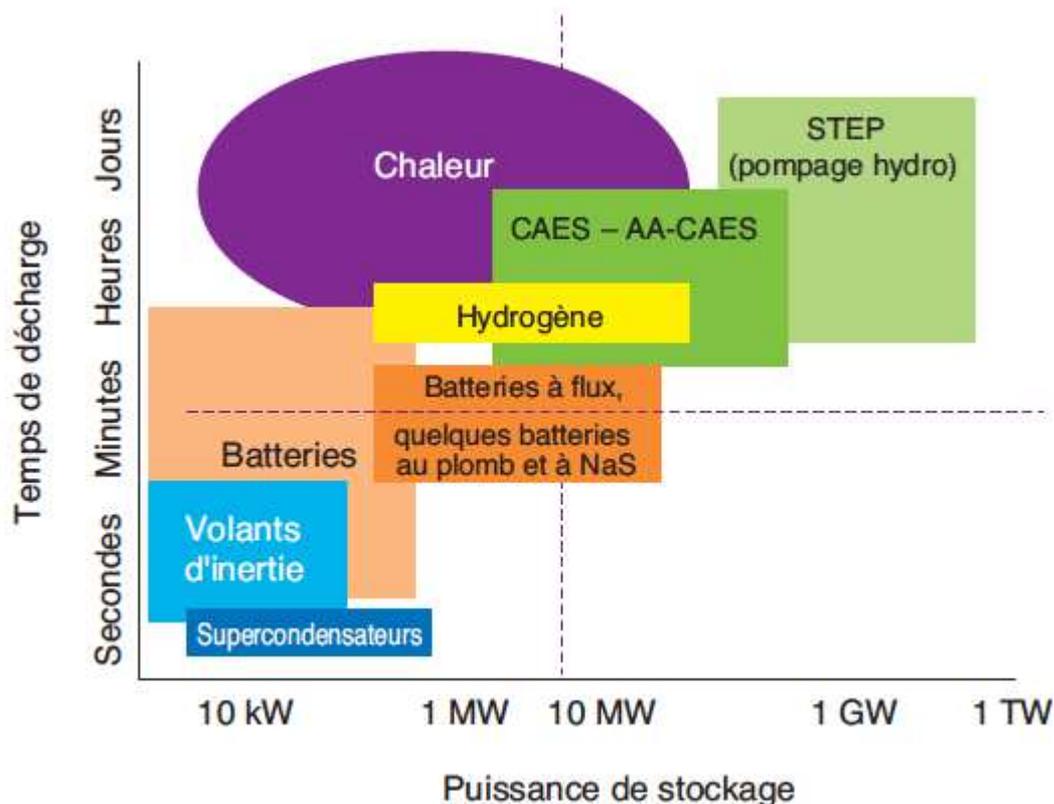


Figure I.1. Capacités des différents moyens de stockage [Tou].

I.4. L'hydroélectricité dans le monde

Du fait de l'impact des stations de pompage sur le productible, les comparaisons avec les autres filières ne seront réalisées qu'en terme d'énergie électrique produite. En revanche, pour éviter ce biais, le développement historique de la filière ne sera étudié qu'en termes de capacité installée.

Il ressort néanmoins que le marché de l'énergie hydraulique fait apparaître de fort contraste dans le temps et dans l'espace, en production comme en capacité installée [Jun 04].

I.4.1. La production d'hydroélectricité

En 2001, la production hydroélectrique réalisée aussi bien par des grandes installations, y compris les STEP, que par les Petites Centrales Hydroélectrique (PCH) dépasse les 2 645 TWh (sur 15 546 TWh soit 17%).

Chapitre I : Etat de l'art sur l'hydroélectricité

Ce chiffre est comparable à la production électronucléaire mondiale, estimée par l'AIE (Agence Internationale d'Energie) à 2 653 TWh. Cependant, alors que pour diverses raisons (notamment géopolitiques) le marché de l'énergie nucléaire ne se situe que sur une trentaine de pays, les centrales hydrauliques se trouvent à peu près partout dans le monde.

Leur répartition y est toutefois très inégale : 20 pays produisent 80% de l'hydroélectricité mondiale, la France produit presque autant que toute l'Afrique réunie (79,5 TWh).

De même, la production des pays membres de l'OCDE (l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques) représentent près de la moitié de celle produit dans le monde même si cet état de fait est en grande partie la conséquence de deux pays : le Canada et les Etats-Unis. Le Canada est le plus grand producteur d'hydroélectricité (333,1 TWh, soit 12,6 % de l'hydroélectricité mondiale), ensuite vient la Chine (277,4 TWh), le Brésil (267,9 TWh) et les Etats-Unis (223,2 TWh). Ces quatre grands pays combinés totalisent à eux seuls plus de 41% de la production d'énergie hydraulique mondiale. La France se place en 9^e position avec 78,6 TWh.

Il existe plus de 15 pays dont le total d'électricité générée provient d'au moins 90% de la production hydraulique et près de 40 pays pour plus de 50%. Les grands pays les plus engagés en pourcentage de leur production totale sont la Norvège (99,3%), le Brésil (81,7%), le Venezuela (67,2%) ou le Canada (56,7%) [**Jun 04**].

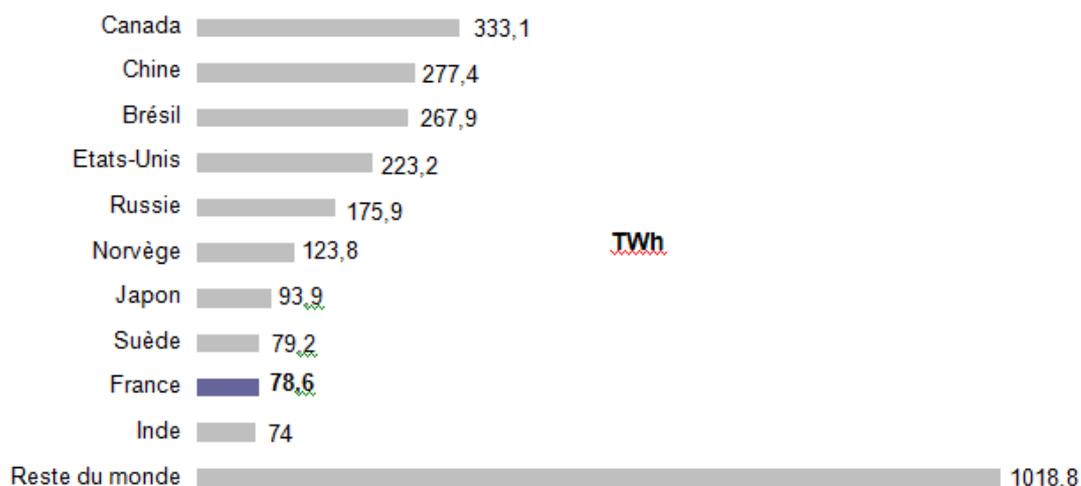


Figure I.2. Répartition des principaux pays producteurs pour l'année 2004
[Jun 04].

I.4.2. La capacité installée

Le développement conséquent de l'énergie hydroélectrique date des années 1950, plus particulièrement après la seconde guerre mondiale. La période 1950-1990 a été la plus favorable avec une multiplication par 12 des capacités installées, soit un rythme de croissance moyen de 6,5% par an.

A partir de 1990, la filière hydroélectrique a commencé à montrer des signes de ralentissement ; si les capacités mondiales sont de 774,6 GW en 2003, la croissance moyenne sur ces treize dernières années n'est plus que de 1,7% par an et vient principalement des pays hors de l'OCDE.

Les deux conditions préalables au développement d'une nation étant l'énergie et l'eau, il est naturel de trouver les pays hors de l'OCDE en tête dans le classement des nations les plus dynamiques en matière de construction de nouveaux barrages. En revanche, les pays de l'OCDE ont réalisé le gros de leur efforts il y a des décennies et se contentent désormais d'entretenir ou de rénover leur parc. Ce phénomène se remarque aisément depuis 1990 : alors que les capacités des pays hors OCDE augmentaient de 42%, l'OCDE n'augmentait son hydraulique installée que de 12%.

Les capacités de l'ensemble des pays de l'OCDE sont ainsi passées successivement de 82,9% de la capacité hydroélectriques mondiale en 1950 à 64,5% en 1980 et 52,8% en 2003. Il faut en effet se tourner vers les pays hors de l'OCDE pour voir apparaître une réelle augmentation : si l'Afrique, le reste de l'Europe ou les pays de l'ex-URSS progressent au rythme maximum de 0,7% par an ces dix dernière années, l'Amérique latine (notamment avec le Brésil), l'Asie et surtout la Chine font preuve d'un véritable engouement pour la filière [Jun 04].

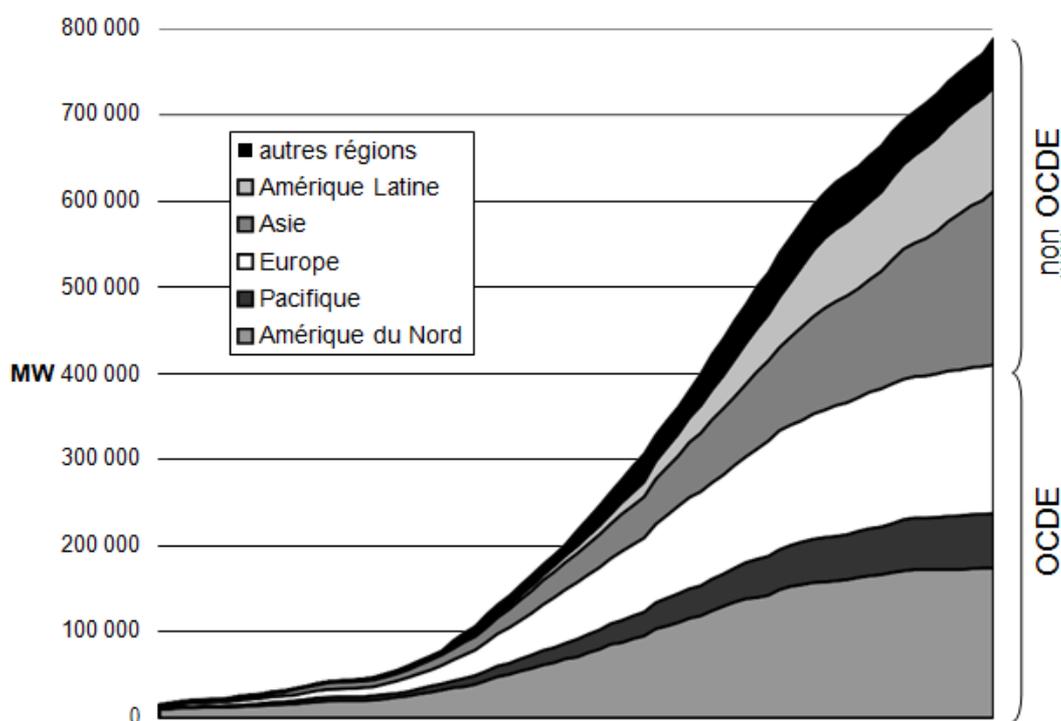


Figure I.3. Evolution des capacités hydroélectriques mondiales [Jun 04].

I.5. Les STEP dans le monde

Le besoin de plus grande flexibilité dans l'exploitation des réseaux électriques par l'introduction du stockage est lié historiquement à la rigidité d'exploitation des grandes centrales thermiques pour lesquelles les variations de charge nécessaires pour s'adapter à la consommation sont coûteuses et pénalisantes sur leur durée de vie. En 2015, c'est le fort

Chapitre I : Etat de l'art sur l'hydroélectricité

développement des énergies renouvelables intermittentes qui induit ce besoin de flexibilité (tableau 1).

Au niveau mondial, 99% du stockage stationnaire de l'énergie électrique est assuré par les STEP. La capacité mondiale atteignait 140 GW_e à fin 2011 pour 400 STEP en fonctionnement dont 46 MW_e pour l'ensemble européen, 45 en Asie, 21 aux Etats Unis (tableau I.1).

La Chine est le pays le plus en pointe dans ce domaine : en 2009, elle comptait 22 STEP pour une puissance installée de 11 GW_e qui devrait être portée à 50/60 GW_e en 2020. En Europe tous les pays qui développent de façon massive leur production d'énergie intermittente ont des besoins importants de stockage [Jun 04].

Pays	Nbre de STEP P>1000 MW capacité correspondante	Nbre de STEP en construction de P>1000 MW capacité correspondante	Installations remarquables
CHINE	13-17900 MW	6-8200 MW	Huizhou 2450 MW Guangzhou 2400 MW Tianhuangping 1800 MW
ETATS UNIS	10-14300 MW	.	Bath Country 3000 MW Lundington 1870 MW
JAPON	7-9300 MW	2-4400 MW	Kannagawa 2820 MW Okutataragi 1930 MW
EUROPE	Capacité installée	Capacité en construction	Installation remarquables
Allemagne	2580 MW	1300 MW	Goldisthal 1060 MW Markensbach 1050 MW
Autriche	1480 MW	570 MW	Malta-Reisseck 1030 MW
Espagne	1600 MW	850 MW	Cortes-LaMuela 910 MW
Portugal	2260 MW	950 MW	Alqueva 520 MW

Chapitre I : Etat de l'art sur l'hydroélectricité

Italie	4330 MW	.	Roncovalgrande 1060 MW Entracque 1320 MW
Suisse	3190 MW	1900 MW	Lintz-Limmern 1000 MW Nant de Drance 930 MW
France	4200 MW	.	Grand Maison 1790 MW Montezic 910 MW Super Bissorte 730 MW
Royaume Uni	2490 MW	.	Dinorewig 1730 MW

Tableau I.1. Principaux pays équipés en STEP [Tou].

I.5.1. Quelle que exemples de STEP dans le monde

On donne deux exemples de station de STEP à base d'éolienne et de parc solaires :

- a) **La petite île d'El Hierro**, située dans l'archipel espagnol des Canaries, est en phase de devenir la première île indépendante en énergies renouvelables au monde

Balayée par des vents puissants venant de l'océan, la centrale est constituée de 5 éoliennes totalisant 11,2 MW de puissance. L'énergie en surplus est stockée grâce à un système de pompage turbinage :

- **POMPAGE** : l'eau d'un bassin de 150 000 m³ est pompée vers un deuxième bassin de 550 000 m³ situé 700 mètres plus haut.

- **TURBINAGE** : En l'absence de vent, l'eau du bassin supérieur est relâchée et alimente au passage quatre turbines hydrauliques totalisant 11,3 MW de puissance [Eco].

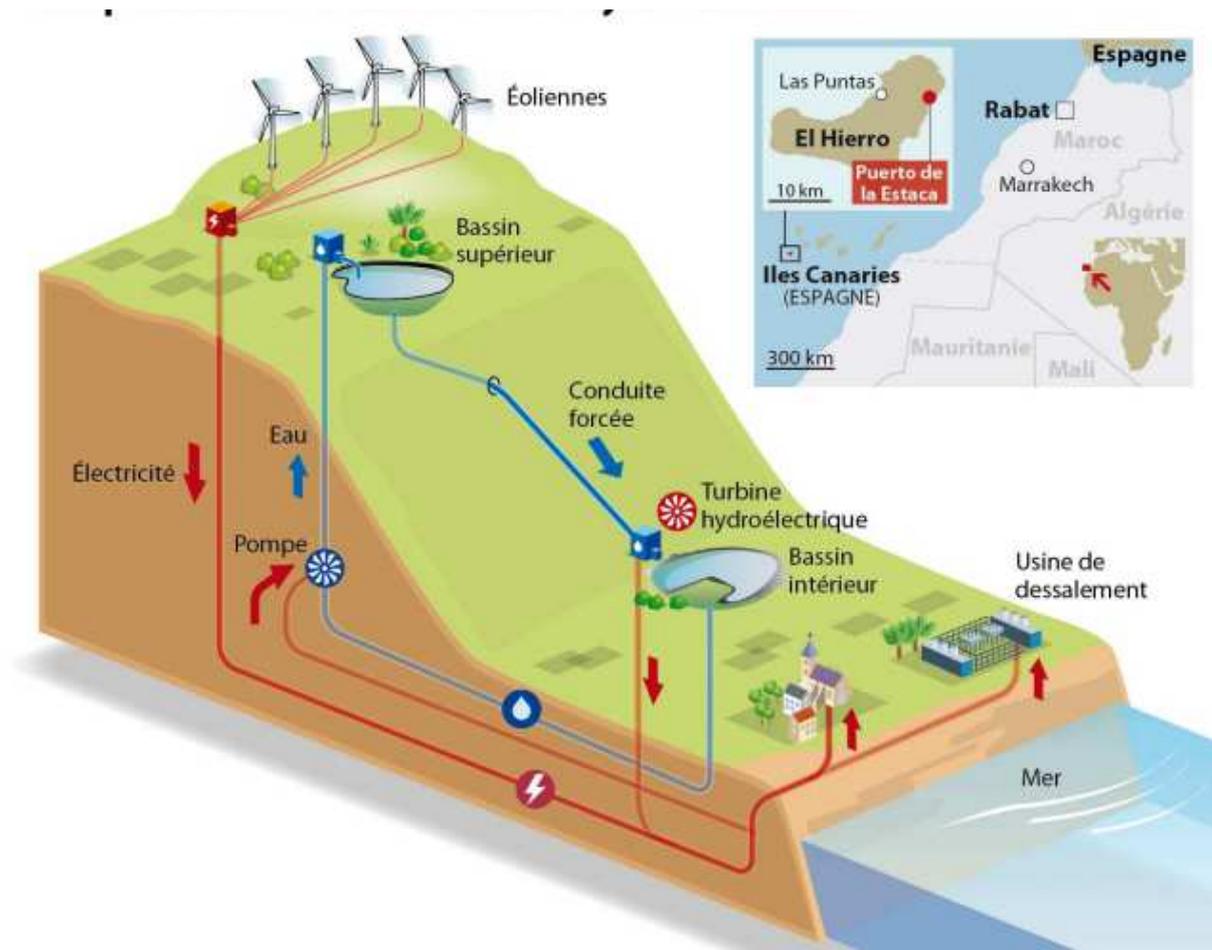


Figure I.4. Cinq éoliennes et une centrale hydro-éolienne [Eco].

b) La centrale hydraulique de Revin Saint Nicolas Les Mazures

EDF (Électricité de France) exploite En France à Revin, dans les Ardennes, une centrale d'un type particulier. La centrale de Revin remplit ses deux lacs-réservoirs par pompage lorsque la demande d'électricité est faible et les utilise pour produire de l'électricité lorsque la demande est particulièrement importante.

Les bassins réservoirs sont situés à Rocroi et aux Mazures, communes voisines de Revin, et se nomment bassin de Whitaker et bassin des Marquisades. La capacité de ces bassins s'élève jusqu'à 7 millions de mètres cube d'eau. Techniquement, la technique de production d'électricité est celle d'une centrale hydroélectrique.

Chapitre I : Etat de l'art sur l'hydroélectricité

Avec une hauteur de chute importante, la puissance de la centrale peut s'élever à 800 MW et maintient l'offre d'électricité sur le réseau en cas de baisse de tension due par exemple à l'arrêt brutal d'une centrale conventionnelle [Tou].



Figure I.5. Centrale de Revin [Tou].

Cielos, Espejo de Tarapacá CHILI

Localisation : Désert d'Atacama nord Chili

Parc solaire : Surface : 1650 ha Puissance : 600 MW Production : 1,8 TWh

Investissement : 900 M US\$ STEP Puissance : 300 MW Investissement : 400 M US\$

[PAT 15].

ESQUEMA FUNCIONAMIENTO DEL PROYECTO



ESQUEMA DE LA CENTRAL CORTE TRANSVERSAL



Conclusion

Nous avons exposé dans cette partie la situation de l'hydroélectricité dans le monde en général et les stations de transfert d'énergie par pompage en particulier ainsi que la nécessité du passage aux énergies renouvelables.

On a constaté que le développement économique induit un besoin de stockage de l'énergie électrique d'où l'intérêt porter au STEP.

Les différentes parties qui constituent l'installation hydroélectrique seront abordées dans le chapitre suivant.

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

II.1. Introduction

L'introduction des énergies renouvelables, qui sont à caractère intermittent, dans le réseau électrique conventionnel requiert des capacités de stockage de l'énergie électrique et de réglage du réseau que les centrales hydroélectrique de pompage turbinage peuvent fournir.

De ce fait les groupes de pompage turbinage constitue un appuie important pour les énergies renouvelables qui prend de plus en plus place dans le secteur énergétique vue leur caractère non polluant et gratuit.

Le système à étudier se met entre une source d'énergie, renouvelable et le réseau électrique, figure II.1, et il sert d'appuie pour une meilleur injection de la puissance produite /extraite au réseau (lissage de puissance).

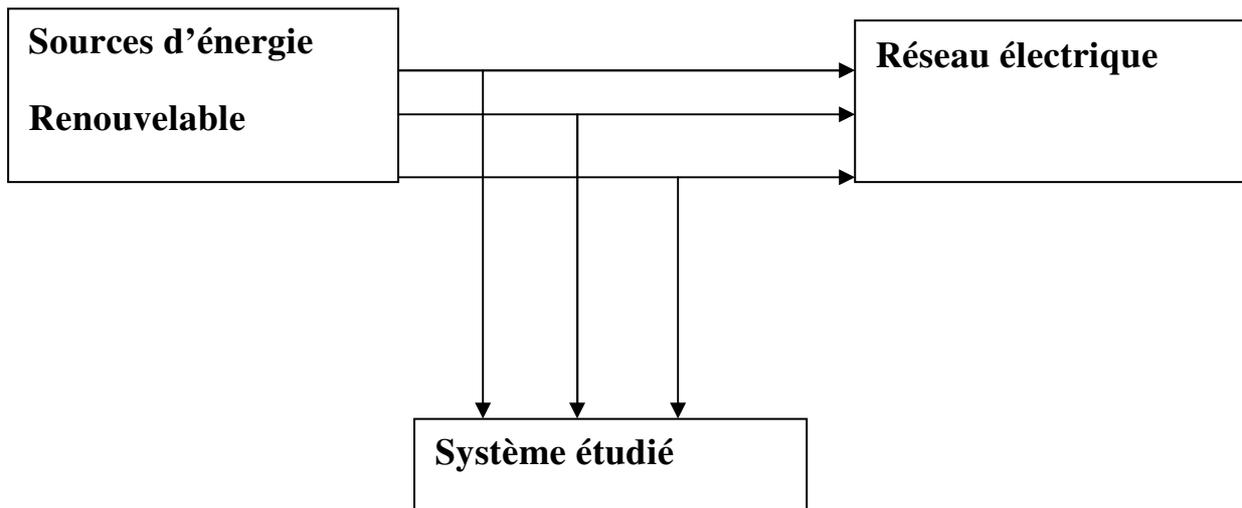


Figure II.1. Description générale du système

L'évolution des technologies relatifs au centrale hydroélectrique de pompage turbinage fait que les anciennes centrales travaillant a vitesse fixe devient des centrales a vitesse variable pour plusieurs raisons, et acquis un meilleur rendement et une meilleur flexibilité pour régler le problème de la demande en électricité et aussi une meilleur injection de la puissance issue des énergies renouvelables au réseau.

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

Nous allons exposer dans ce chapitre les différents blocs constituant une centrale hydroélectrique et les choix de ces éléments.

II.2.1. Vue globale sur le système de stockage turbinage

On trouve dans la bibliographie plusieurs systèmes de stockage associé à la centrale de production d'énergie électrique à base d'énergie renouvelable et parmi ces systèmes le pompage turbinage constitue la technologie la plus mature d'entre toutes.

Ce concept à base de systèmes d'accumulation par pompage comme esquissé dans la figure II.2 exige deux réservoirs d'eau et une pompe-turbine réversible avec une machine électrique reliée au réseau électrique. La machine doit fonctionner comme moteur en mode pompage et comme générateur en inversant le sens de rotation lorsque le système fonctionne en mode turbine. Ces systèmes peuvent être construits pour presque n'importe quelle gamme de puissance avec une capacité de stockage de l'énergie limitée que par la taille des réservoirs et un rendement global de la station qui est généralement de l'ordre de 75-85% [Roc]. Dans cette forme de base, l'accumulation par pompage est une technologie mature qui a été mise en œuvre et commercialisée à grande échelle, avec plus de 90 GW de capacité installées dans le monde.

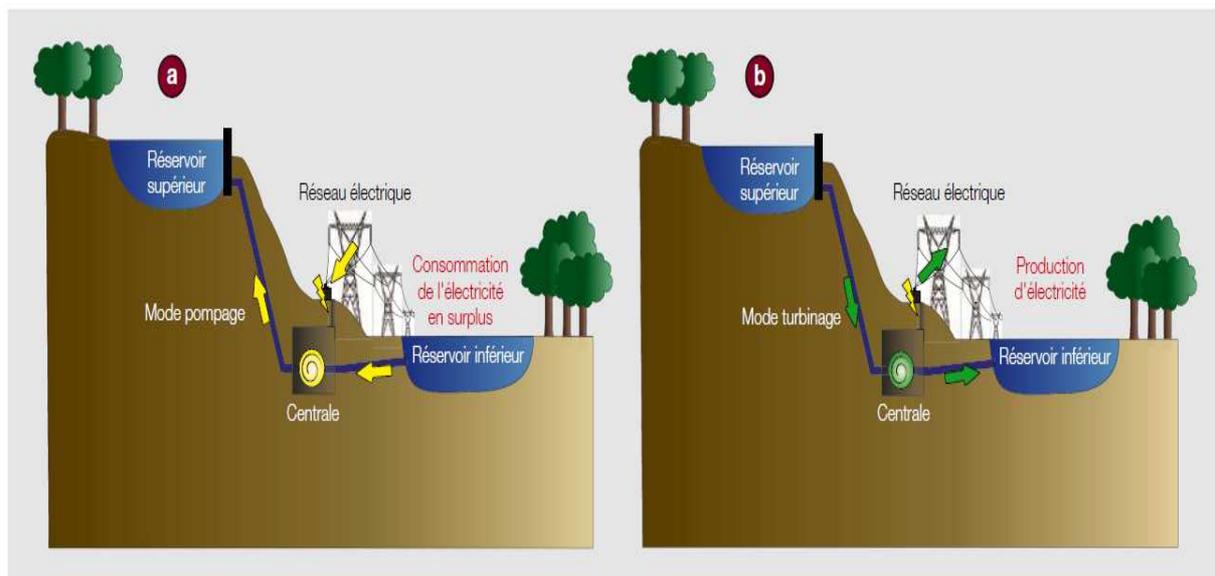


Figure II.2. Principe du pompage-turbinage : en mode pompage (a) et en mode turbinage (b)

[Ele 15].

II.2.2. Définition d'une petite centrale hydraulique

C'est une centrale de production d'électricité dans laquelle le flux créé par l'eau amenée par écoulement libre (canaux) ou par des conduites en charge (conduites forcées) actionne la rotation des turboalternateurs, avant de retourner à la rivière. C'est une forme d'énergie renouvelable, propre et non polluante.

Une centrale hydroélectrique transforme l'énergie sauvage d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine, puis en énergie électrique grâce à un générateur [Act].

La petite hydroélectricité (PHE) se caractérise par des installations de production capables de développer une puissance électrique de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts (10 MW au maximum), à partir de chutes d'eau de quelques mètres de haut à plusieurs centaines de mètres de haut. Trois types de turbines sont utilisés : Kaplan pour les basses chutes (5-10 m), Francis pour les chutes moyennes (10-100 m) et Francis et Pelton pour les hautes chutes (50 à 400m)

Les centrales de basse chute consistent en un seuil qui dérive l'eau dans un canal d'amenée qui la conduit à la centrale. La restitution de l'eau se fait en aval dans le canal de fuite qui rejoint le cours d'eau dérivé. Les centrales de haute chute sont dotées d'une prise d'eau en montagne et d'une conduite forcée qui amène l'eau à la centrale puis la restitue [Pai 02].

II.2.3. Ressources et applications

Une petite centrale hydraulique est une installation de production d'énergie électrique basée sur la conversion de la force hydraulique qui provient généralement:

- d'un fleuve ou une rivière,
- d'un barrage d'irrigation,
- d'un réseau d'approvisionnement en eau potable,
- d'un réseau d'évacuation des eaux usées ou de drainage,
- de procédés industriels dans lesquels la pression d'un liquide est réduite dans un organe de réglage, vanne ou autres...

La production des centrales hydrauliques est fonction du débit turbiné et de la hauteur de la chute disponible. Les débits pour les petites centrales hydrauliques peuvent varier de quelques

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

litres à plusieurs mètres cubes par seconde. Par ailleurs, une hauteur de chute de deux mètres est suffisante et considérée comme exploitable.

L'importance des petites centrales hydrauliques apparaît surtout au niveau local (régional) et plusieurs applications s'en détachent :

- Elles peuvent être intégrées dans les projets à usages multiples et en améliorer la couverture des frais par la production d'énergie. Par exemple : lors d'un renouvellement ou construction d'une adduction d'eau potable.
- Elles permettent l'intégration des sources renouvelables intermittentes (éolien et photovoltaïque) dans les sites isolés en lissant leurs intermittences.
- Elles augmentent la sécurité d'approvisionnement de certaines entreprises.

· Avec le concept des micros réseaux et de la génération distribué (GED), les petites centrales hydrauliques avec leur production quasi continue peuvent jouer un rôle de régulation ou de secours important [Bel 13].

II.2.4. Classification

La classification s'effectue en fonction de la manière dont l'eau est captée et conduite à la turbine, de l'emplacement de cette dernière et de la hauteur de chute ou dénivellation exploitée.

On distingue deux classes principales de petites centrales :

- a) **Installations à basse pression** le long d'un cours d'eau ou sur un canal de dérivation. L'ouvrage le plus important est le barrage, ou prise d'eau, le plus souvent construit en béton. Sa fonction est de détourner le débit nécessaire directement vers la turbine ou dans un canal de dérivation tout en laissant passer les crues. La centrale est soit intégrée directement dans le barrage, soit placée à l'extrémité d'un canal.

Il n'y a en règle générale pas de conduite forcée, ou celle-ci reste très courte. Les chutes se situent entre 2 et 20 mètres et la pression dans la turbine est faible (0,2 à 2 bars).

- b) **Installations à moyenne et haute pression** sur des cours d'eau, des sources de montagne, des réseaux d'eau potable et dans des circuits hydrauliques industriels. Aux composants mentionnés pour la première catégorie s'ajoute une conduite forcée

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

entre la prise d'eau, ou l'extrémité du canal de dérivation, et la centrale. La conduite est l'ouvrage le plus important de ce type de petite centrale [Bre 08].

II.2.5. Les avantages de la petite hydraulique

Loin des grands barrages hydroélectriques, le petit hydraulique fait appel à des installations de petites tailles, le plus souvent en cascade. Un dimensionnement idéal pour une mise en régie locale de cette source d'énergie renouvelable

Les principaux avantages énergétiques et environnementaux de cette énergie sont les suivants:

- C'est une ressource renouvelable. En effet, l'eau utilisée est toujours intégralement restituée.
- C'est une ressource locale, et donc stratégique pour les questions d'indépendance énergétique.
- Elle n'est généralement pas émettrice de gaz à effet de serre (GES) durant sa phase d'exploitation. C'est toujours vrai pour les ouvrages "au fil de l'eau" (sans stockage), sur lesquelles se porte un intérêt particulier.
- Elle n'est pas intermittente à court terme, contrairement à l'énergie solaire et à l'énergie éolienne. La production hydraulique varie bien entendu suivant des cycles saisonniers, les cours d'eau pouvant être diminués l'été ou au contraire renforcés par la fonte de glaciers.
- Le matériel ou les équipements sont robustes et ont fait leurs preuves avec une exploitation simple et une durée de vie longue [Bel 13].

II.3. Les différents types de turbines

On peut distinguer deux grandes catégories de turbines hydrauliques : Les turbines à action dites encore à impulsion et les turbines à réaction.

II.3.1. Turbine à action

Dans les turbines à action, l'énergie de l'eau à la sortie de l'injecteur ou du distributeur est entièrement sous forme cinétique et l'eau, à cet endroit, se trouve à la pression atmosphère [Goud].

II.3.1.1 Principe de fonctionnement

Un jet libre agit sur des augets ou des aubes profilées placées sur la périphérie d'une roue (action). Ce jet exerce une force sur l'auget en mouvement de rotation, qui est transformée en couple et puissance mécanique sur l'arbre de la turbine. La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage est entièrement sous forme d'énergie cinétique. L'échange d'énergie entre l'eau et l'aubage a lieu à pression constante, généralement la pression atmosphérique. La roue de la turbine est dénuyée et tourne dans l'air [Bre 08].

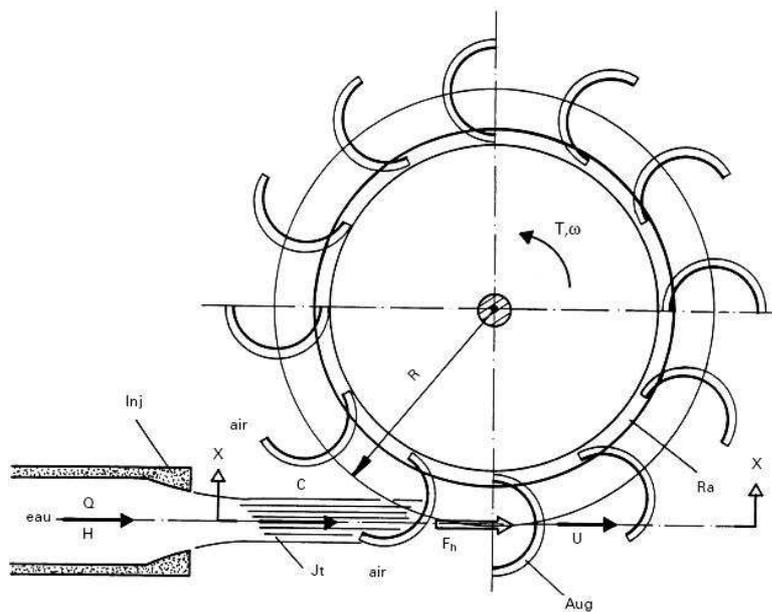


Figure II.3 Schéma d'une turbine à action avec ses paramètres de fonctionnement [Bre 08].

Composants:

Inj : injecteur

J_t : jet d'eau

Ra: roue de la turbine

Aug: auget ou aube profilée

Paramètre :

Q: débit (m³/ s)

H: chute nette (m)

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

$E = gH$: énergie massique nette (J / kg) ; $C \approx (2gH)^{1/2}$ vitesse de l'eau du jet (m / s)

$T = R \cdot F_h$: couple sur l'arbre (Nm) ; w : vitesse de rotation (rad / s)

R : rayon de la roue tangent au jet (m)

$U = wR$: vitesse périphérique de la roue à l'auget (m / s)

F_h : force hydrodynamique du jet sur l'auget (N)

II.3.1.2. Types de turbines à action

Dans cette catégorie, on trouve :

- Les turbines Pelton
- Les turbines Turgo
- Les turbines Banki-Michell

II.3.2. Turbines à réaction

Dans les turbines à réaction, l'énergie à la sortie du distributeur, se trouve à la fois, sous forme de pression et d'énergie cinétique. La pression de l'eau est supérieure à la pression atmosphérique [**Goud**].

II.3.2.1. Principe de fonctionnement

Une turbine à réaction est une machine fermée (noyée) qui utilise à la fois la vitesse de l'eau (énergie cinétique) et une différence de pression. Deux principes sont à la base de son fonctionnement :

- la création d'un tourbillon au moyen d'une bêche spirale, d'aubages directeurs, ou les deux à la fois ; - la récupération du mouvement circulaire du

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

tourbillon par les aubages d'une roue en rotation qui dévient les filets d'eau pour leur donner une direction parallèle à l'axe de rotation.

- Ces aubages se comportent comme une aile d'avion : l'écoulement de l'eau provoque sur le profil de l'aube une force hydrodynamique qui induit un couple sur l'arbre de la turbine. Comme pour une aile d'avion, la force portante résulte d'une différence de pression entre les deux faces du profil [Bre 08].

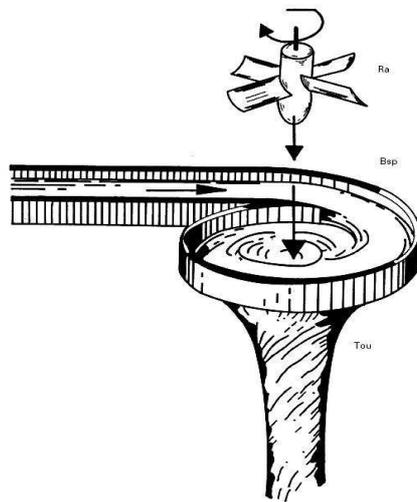


Figure II.4. Image schématique d'une turbine à réaction [Bre 08].

Bsp: canal à tourbillon figurant la bêche spirale

Rap: roue à palettes figurant la roue à aubes de la turbine, placée dans le tourbillon d'eau toue

L'équation fondamentale d'une turbine à réaction est l'équation d'Euler, qui définit la relation entre les vitesses à l'entrée et à la sortie de l'aubage et l'énergie massique à disposition : $E = gH = U_1V_{1u} - U_2V_{2u}$ (J / kg)

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

Avec :

$U_1 = \omega R_1$	Vitesse périphérique de l'aubage à l'entrée de la roue (entrée du filet d'eau), dite vitesse d'entraînement
V_{1u}	Composante périphérique de la vitesse absolue V de l'eau à l'entrée de la roue (tourbillon d'entrée) ;
$U_2 = \omega R_2$	Vitesse de l'aubage à la sortie de la roue, dite vitesse d'entraînement ;
V_{2u}	composante périphérique de la vitesse absolue V de l'eau à la sortie de la roue (tourbillon de sortie) ;
$U_1 V_{1u}$	définit l'énergie du tourbillon d'entrée créé par la bêche spirale et / ou les aubages directeurs ;
$U_2 V_{2u}$	définit l'énergie tourbillonnaire perdue à la sortie de la turbine. Au point de fonctionnement optimum de la turbine, cette énergie est nulle (pas de tourbillon après la roue) ;
V	est la vitesse absolue de l'eau dans la machine.

II.3.2.2. Types de turbine à réaction

- Turbine Francis
- Turbines hélice et Kaplan

II.3.2.3. Turbine Francis

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

La turbine Francis est une machine à réaction, ce qui signifie que la pression à l'entrée de la roue est supérieure à la pression de sortie de la roue.

Les turbines Francis sont utilisées pour de moyennes chutes et peuvent développer des puissances très importantes.

La turbine à réaction est une turbine immergée qui transforme à la fois la vitesse de l'eau (énergie cinétique) et une différence de pression.

Dans ce sens, elle utilise à la fois un principe réaction et un principe impulsion.

La partie réaction représente la partie où la pression statique du fluide est transmise à la roue alors que la partie impulsion correspond à la partie où l'énergie cinétique du fluide est transmise à la roue [Laval].



Figure II.5. Turbine Francis [Laval].

II.3.2.3.1 Les éléments de construction

a) Une **bâche spirale** reçoit l'eau sous pression de la conduite forcée et la distribue vers l'intérieur de l'anneau qu'elle forme. Sa tenue mécanique est assurée par un cercle d'entretoises profilées.

b) Le **distributeur** est placé au milieu de l'anneau de la bêche spirale. Ses vingt à trente aubes orientables, placées dans le prolongement des entretoises, permettent d'ajuster le débit-volume turbiné.

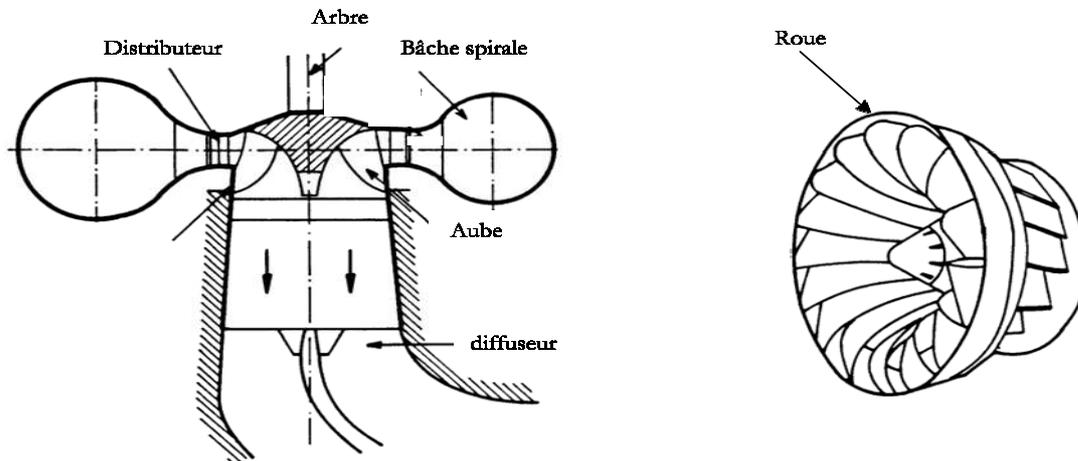


Figure II.6. Schéma représentatif de la turbine Francis [**Pac-B**].

c) Une **roue** à admission radiale, à sortie axiale forme le cœur de la turbine. C'est la seule pièce tournante. Elle compte dix à vingt aubes non orientables, de géométrie tridimensionnelle non développable. Les aubes de la roue reçoivent l'écoulement en reptation à la sortie du distributeur et le dévient pour ne lui laisser qu'une rotation minimale. Le moment cinétique ainsi absorbé produit le couple transmis à l'arbre de la turbine.

d) Le **diffuseur** reçoit l'eau à la sortie de la roue et le conduit à la sortie de la turbine. Comme son nom l'indique, il permet d'abaisser la pression en sortie de roue, sous l'effet du dénoyage éventuel de la machine et grâce à une augmentation progressive de sa section de passage.

- Des pompes sont construites selon le même schéma. L'écoulement dans la roue est alors centrifugé. On trouve enfin des pompes-turbines réversibles, qui assument l'une ou l'autre des fonctions selon leur sens de rotation [**Blo 00**], [**Goud**].

3.2.3.3. Triangle de vitesse

La figure 7 donne une vue schématique des triangles de vitesse à l'entrée et à la sortie de la roue mobile. Le vecteur V_1 est parallèle à la corde de la directrice la plus proche. Dans les conditions idéales de fonctionnement, le vecteur W_1 est tangent à l'aubage au point M_1 et à la sortie de la roue le vecteur V_2 est perpendiculaire au vecteur U_2 . On évite ainsi le choc à

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

l'entrée du rotor qui introduirait de la turbulence et à la sortie. Par ailleurs la projection de vecteur V_2 sur le vecteur U_2 étant nulle, on se trouve dans les conditions de rendement maximum. La situation décrite correspond approximativement au triangle de vitesse d'une turbine Francis ayant une vitesse spécifique voisine de $N_s=200$ tr/min et dont le rotor a le profil des roues mobiles représentées figure 7.

Pour les roues correspond à d'autres valeurs de N_s , la représentation est plus complexe, étant donné la forme des rotors qui n'est plus aussi simple [Goud].

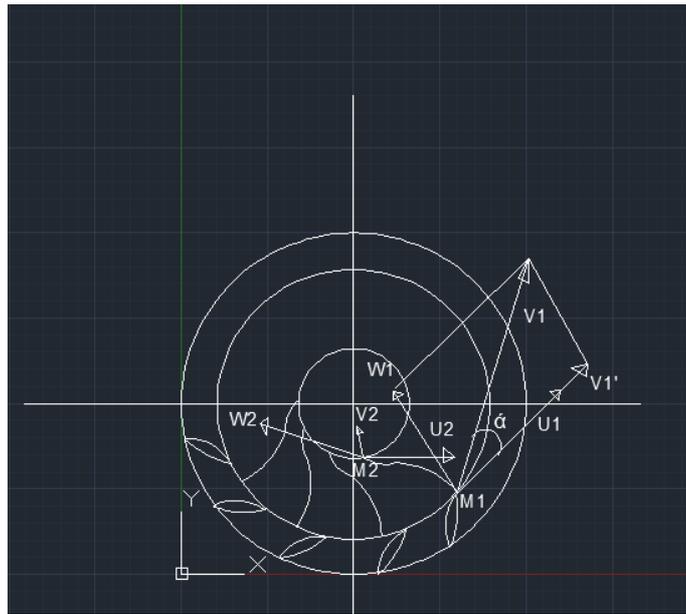


Figure II.7. Triangle de vitesse à l'entrée et à la sortie du rotor d'une turbine Francis [Goud].

II.4. Les grandeurs caractéristiques des Petites Centrales

Hydroélectrique(PCH)

Quatre grandeurs caractéristiques permettent d'évaluer l'importance d'un aménagement hydroélectrique :

- le débit d'équipement,
- la hauteur de chute,
- la puissance de l'aménagement,
- l'énergie électrique produite.

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

Le débit d'écoulement (Q_w) est le débit maximum susceptible d'être turbiné par la centrale, c'est-à-dire le débit maximum absorbé par toutes les turbines lorsque celles-ci fonctionnent ensemble à pleine puissance. Il s'exprime en m³/s.

La hauteur de chute (H) est la différence d'altitude, exprimée en mètre, entre le niveau de l'eau à la prise d'eau (coté de surface libre en eaux moyennes) et le niveau de l'eau à l'endroit de la restitution. La puissance est une fonction combinée du débit d'équipement et de la hauteur de la chute. Elle est exprimée en kilowatts (kW) ou mégawatts (MW).

On distingue habituellement :

- la puissance maximale brute qui exprime la puissance potentielle de l'aménagement

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q_w$$

- la puissance installée qui représente la puissance effective de l'aménagement

$$P_{mec} = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q_w$$

η : rendement de l'ensemble turbine-générateur, lequel varie principalement entre 0,6 et 0,9 selon la puissance [Bel 13].

II.5. Equation de Bernoulli

Travail d'un fluide

Le travail d'un fluide au sein d'une turbine hydraulique peut s'exprimer par l'équation de Bernoulli [Pac-B] :

$$\frac{1}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \frac{1}{\rho}(P_1 - P_2) + g(z_1 - z_2) = W_h$$

avec : v_2 la vitesse du fluide en entrée (m·s⁻¹).

v_1 la vitesse du fluide en sortie (m·s⁻¹).

P_1 la pression du fluide en entrée (Pa).

P_2 la pression du fluide en sortie (Pr).

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

z_1 l'altitude d'entrée (m).

z_2 l'altitude de sortie (m).

g : l'accélération de la pesanteur ($m \cdot s^{-2}$).

Cette équation exprime le travail d'une masse de 1kg de fluide qui traverse une machine hydraulique :

$\frac{1}{2}(v_1^2 - v_2^2)$ est une énergie cinétique ;

$\frac{1}{\rho}(P_1 - P_2)$ est une énergie de pression ;

$g(z_1 - z_2)$ est une énergie potentiel de pesanteur ;

W_h est l'énergie fournie (pompe) ou consommée (turbine) par la machine hydraulique.

II.6. Solutions techniques

II.6.1. Trois solutions techniques sont envisageables pour ces installations (figure II.8).

a) Les groupes séparés

Le choix des groupes séparés consiste à prévoir un groupe turbine-générateur et un groupe pompe-moteur utilisant les mêmes réservoirs et/ou éventuellement les mêmes conduites pour leur mode de fonctionnement respectif. Les deux groupes peuvent se situer dans la même centrale, dans le cas de Châtelard II (VS)(France) ou bien, comme dans le cas des centrales de Zermeiggern (Mattmark,VS)(Suisse), dans deux centrales différentes.(VS variable speed)

b) Le groupe ternaire

Un groupe ternaire regroupe une turbine, une pompe et un moteur-générateur sur le même arbre mécanique. Ce choix a été fait pour l'aménagement de FMHL+ (Force Motrice Hongrin-Léman) (suisse) en installant une turbine de type Pelton accouplée à une pompe centrifuge à 4 étages.

c) Le groupe réversible

Un groupe réversible est, quant à lui, constitué d'une pompe-turbine réversible accouplée à un moteur-générateur. Les machines qui seront installées dans les centrales de Nant de Drance et de Linthal (Suisse) sont des pompes-turbines Francis à vitesse variable. La première machine de ce type a été installée à Grimsel 2 [Ele 15].

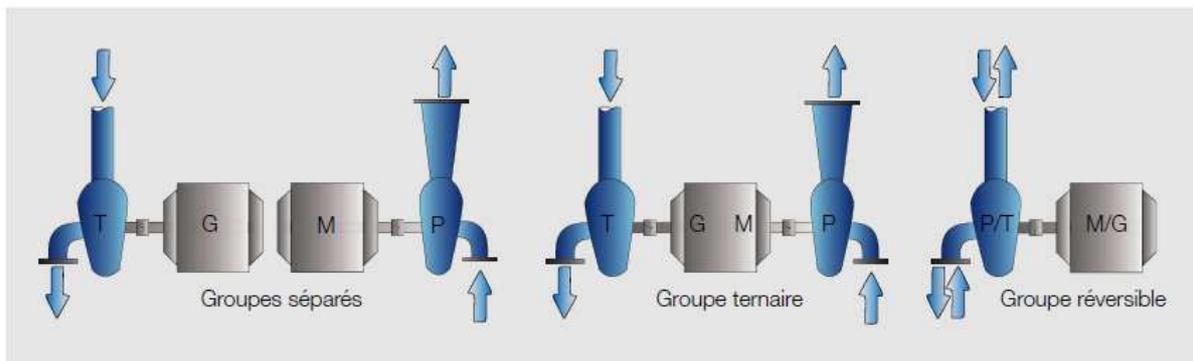


Figure II.8. Différentes architectures de groupes de pompage-turbinage [Ele 15].

II.6.2. Avantages des diverses solutions techniques

Le choix d'une architecture séparée ne se pose que lorsqu'on modifie une centrale hydroélectrique existante dans laquelle on ajoute une ou plusieurs unités de pompage. L'avantage réside dans le fait de n'avoir à dimensionner que le groupe de pompage et ceci pour son meilleur point de fonctionnement, le groupe de turbinage étant existant. Cependant cette architecture n'est plus utilisée car, lors d'une modification ou réhabilitation d'une centrale hydroélectrique, les groupes hydrauliques existants sont souvent remplacés par des machines récentes et plus performantes. En effet, dans les nouveaux projets, les principales architectures utilisées sont l'architecture ternaire ou réversible.

L'avantage d'une solution ternaire est de pouvoir dimensionner la turbine et la pompe pour leur meilleur point de fonctionnement et ainsi profiter du meilleur rendement dans chacun des deux modes de fonctionnement. Néanmoins le coût de ce type d'installation est plus élevé qu'une solution réversible. Cette dernière est plus compacte; plus intéressante financièrement que les deux autres. De plus, le fonctionnement « à vitesse variable » apporte d'importants avantages :

- En mode turbine, le rendement d'opération à charge partielle est meilleur et les limites opérationnelles sont plus étendues, ce qui permet d'avoir une plus grande puissance à basse chute.
- En mode pompe, la vitesse variable permet d'avoir une opération adaptée à la puissance d'entrée à chacune des chutes.

Cependant, un groupe réversible nécessite un équipement additionnel pour fournir le couple de démarrage nécessaire au fonctionnement en mode pompe [Ele 12].

II .7. Les génératrices

Dans les petites centrales hydroélectriques à vitesse fixe, deux grands types de génératrices sont utilisés : synchrones ou à induction (asynchrones). Les autres composants mécaniques et électriques d'une petite centrale hydroélectrique sont les suivants:

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

- multiplicateur de vitesse pour faire tourner la génératrice à sa vitesse de rotation idéale à partir de la vitesse de rotation de la turbine (au besoin);
- vanne(s) d'isolement de l'eau pour la ou les turbines;
- système de contrôle hydraulique pour les turbines et les soupapes;
- système électrique de protection et de contrôle;
- système de télécommunication ;
- systèmes d'alarme incendie et de sécurité (au besoin)
- connexion à un réseau de distribution ou plus rarement de transport [**Bel 13**].

II.8. Machines synchrones à aimants permanents

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- ✓ les machines synchrone à rotor bobiné
- ✓ les machines synchrone à réluctance
- ✓ les machines synchrone à aimants permanents.

Notre intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé). La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance. L'utilisation des aimants comme inducteur dans la MSAP offre, par rapport aux autres types de machines, beaucoup d'avantages, entre autres [**ABD11**].

- ✓ Un facteur de puissance et un rendement élevés
- ✓ Une plus grande robustesse par rapport au moteur à courant continu
- ✓ Une puissance et couple massique élevée

Chapitre II : Description de la centrale hydraulique

- ✓ Un développement de la technologie des composants de l'électronique de puissance et l'apparition des processeurs numériques à fréquence élevée et à forte puissance de calcul ont permis d'apporter des solutions au problème de l'implantation d'algorithmes de commande de l'onduleur assurant ainsi l'autopilotage de la MSAP
- ✓ Une amélioration de la fiabilité due à l'absence de contacts balais-bagues dans ces machines réduit les problèmes de maintenance
- ✓ Une absence de pertes résistives au rotor
- ✓ Une possibilité d'obtenir une excitation sans pertes à effet joule [SAM13].

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de 120° [AMI12].

Le rotor de la machine synchrone à aimant permanent est constitué d'aimants qui peuvent prendre plusieurs configuration dont

- ✓ Aimants en surface ;
- ✓ Aimants insérés ;
- ✓ Aimants enterrés ;
- ✓ Aimants à concentration de flux.

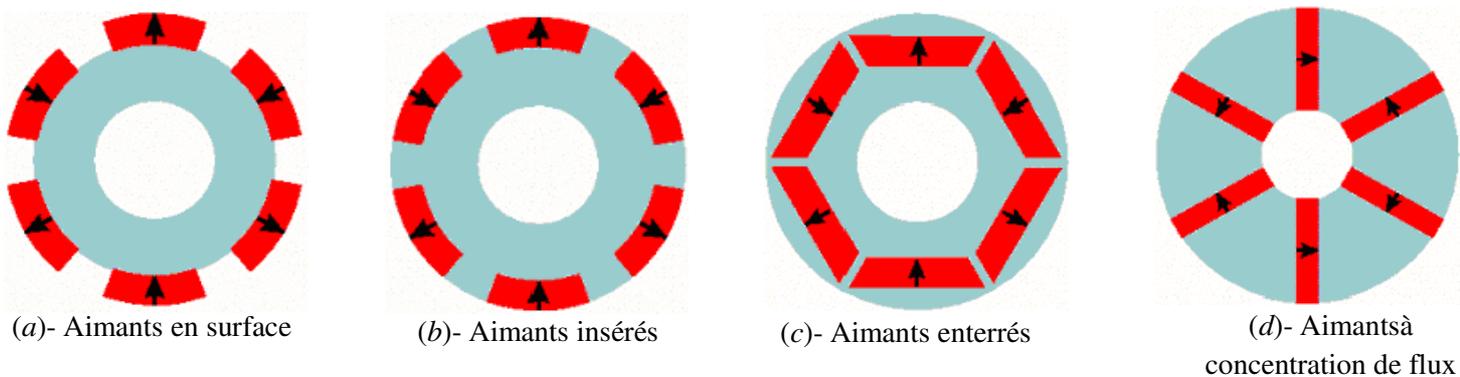


Figure II.9 Rotors d'une MSAP

II.9. Petite centrale hydraulique (Vitesse fixe et Vitesse variable)

Avant de passer aux petites centrales hydrauliques à vitesse variable, il est utile de rappeler brièvement le principe de fonctionnement des petites centrales hydrauliques à vitesse fixe.

Les turbines qui fonctionnent à vitesse fixe sont munies d'un système dit 'de vannage' qui permet la variation du débit d'écoulement de l'eau à l'entrée de la turbine afin d'avoir une vitesse de rotation fixe. Cette vitesse doit obligatoirement rester constante pour avoir une fréquence fixe. Le système de vannage est constitué généralement des aubes directrices orientables, d'un servomoteur et d'un système de régulation (basé sur des régulateurs PI classiques) qui permet l'asservissement de l'angle d'ouverture des aubes directrices (dans la turbines à réaction).

Similairement aux générateurs éoliens, l'amélioration du rendement des turbines hydrauliques passe par la vitesse variable comme le montre la figure II.10. À vitesse variable, les microcentrales hydroélectriques peuvent également fournir d'autres moyens pour l'amélioration de la stabilité du réseau comme l'injection de réactif par exemple [VLH].

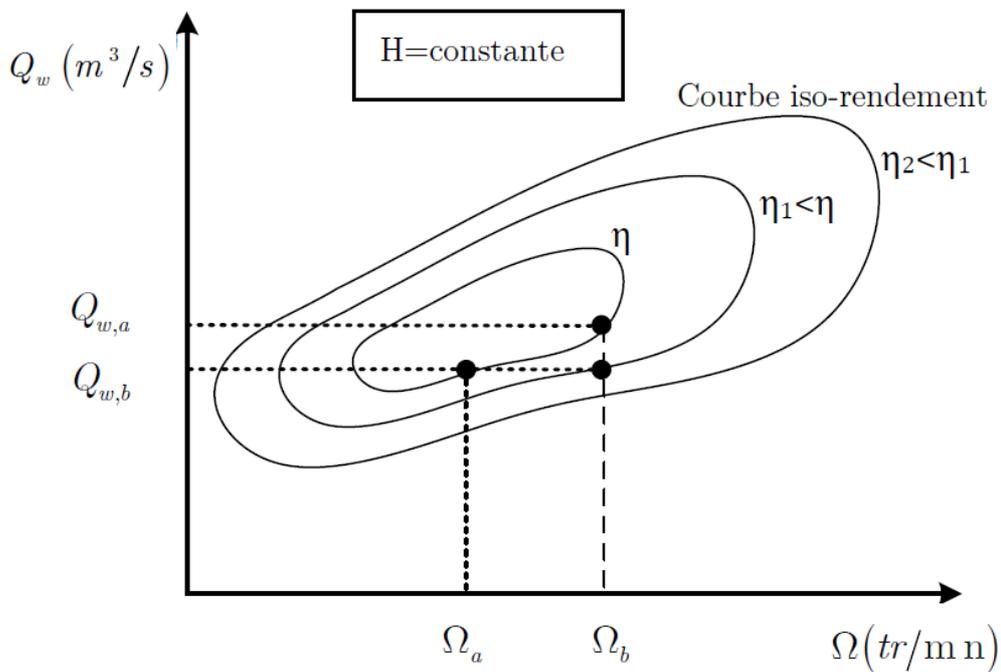


Figure II.10. Intérêts de la vitesse variable pour les turbines hydrauliques [Bel 13].

II.10. Structure retenue dans le cadre de notre travail

Après avoir exposé quelques structures pour chaque élément du système on a opté pour les choix suivants :

- Pompe turbine réversible de type Francis
- Machine synchrone à aimants permanents en surface

II.11. Conclusion

On a essayé de donner dans ce chapitre d'illustrer au mieux le développement technologique concernant les petites centrales hydroélectriques, exposer les éléments du système ainsi que les choix techniques qu'on peut adopter, et au finale la structure retenue dans le cadre de notre travail. Pour la suite de ce mémoire on va essayer de retrouver des modèles mathématiques pour chacun des éléments puis les simuler sous l'environnement Matlab/Simulink.

Chapitre III : Modélisation et simulation des différentes parties de la centrale

III.1.Introduction

Les chapitres précédents ont permis d'implanter une plateforme de travail. Il est question de modéliser les différents sous-ensembles introduits au chapitre 2, conformément à la littérature et aux caractéristiques.

Cette partie est consacrée à la modélisation des éléments constituant d'une station de pompage turbinage à vitesse variable. Des modèles dynamiques sont construits pour chaque élément composant la structure de la microcentrale et ce, afin que toute partie du système puisse être simulée, commandée ou émulée séparément et/ou globalement.

La démarche suivie pour réaliser le modèle de chaque sous-ensemble, commence par les équations gouvernant le fonctionnement du sous-ensemble considéré. Ces équations peuvent être hydrauliques, mécaniques ou électriques. L'organisation de ses équations sous forme de modèle tient compte des objectifs (pédagogique et scientifique) désirés [Jus13].

Les modèles seront adaptés à une exploitation par le logiciel *Matlab/Simulink*, qui d'une part permet la mise en place rapide des modèles et des lois de contrôle et d'autre part est un environnement qu'on retrouve sur les systèmes de prototypage rapide [Bel 2013].

III.2.Description de la station de pompage turbinage étudiée

Pour les petits développements hydroélectriques, le coût d'investissement est l'un des facteurs clés. Par conséquent, il existe une forte demande pour le développement de systèmes hydroélectriques à faible coût qui produisent davantage d'énergie propre. Étant donné que ces systèmes seront construits dans les régions reculées, d'un accès souvent difficile, de tels systèmes doivent répondre aux exigences suivantes :

- 1) Un système à faible coût.
- 2) Vitesse de fonctionnement variable qui permet l'extraction d'un maximum de puissance.
- 3) Une génératrice sans bagues ni ballais (*brushless*) avec une structure de contrôle robuste ayant un minimum d'entretien.

4) Un système qui respecte la qualité de l'énergie et de manière générale les règles de raccordement imposées aux exploitants [Bel-2013].

La microcentrale hydraulique de l'étude est globalement schématisée par le diagramme présenté dans la figure (III.1). Elle est constituée d'une micro-turbine de type Francis. La turbine est alimentée par une conduite forcée liée directement à un bassin supérieur qui est alimenté à son tour par un canal d'amené en aval. Cette configuration peut être trouvée à proximité des ruisseaux et des cours d'eau permanente sans étiage important favorable aux microcentrales hydraulique à basse chute [Jus13], [AUS 04].

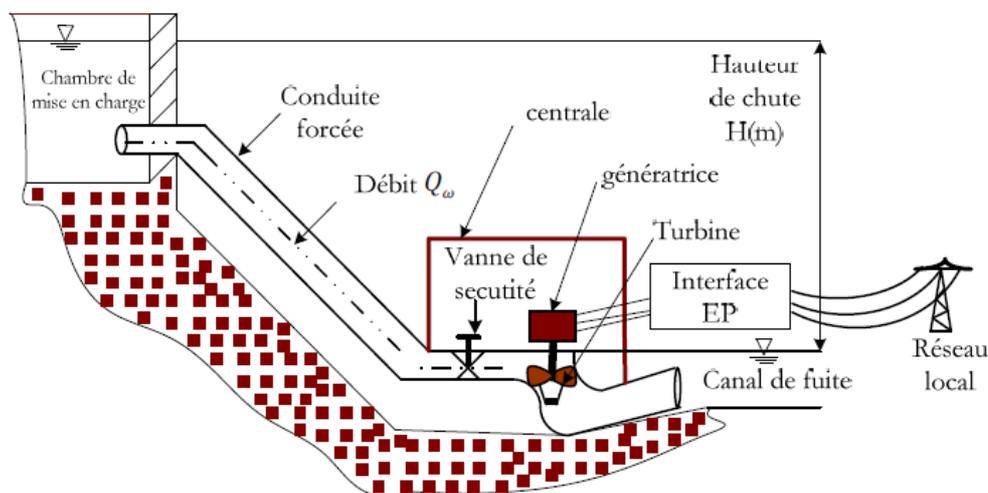


Figure III.1. Diagramme représentatif de la microcentrale étudiée [Bel 13].

Afin de réduire le coût de mise en œuvre et de maintenance, aucun capteur de débit d'eau n'est utilisé et le flux d'eau n'est pas contrôlé. Dans ce contexte, la turbine est complètement exposée à l'énergie gravitationnelle de la chute d'eau.

La machine électrique est une génératrice synchrone à aimants permanents de quelques kilowatts, couplée rigidement à la turbine hydraulique.

III.3.1. Régulation du mode turbinage

Cette section présente le fonctionnement du générateur connecté au réseau.

1) Configuration du générateur connecté au réseau :

Dans la Figure III.2, nous supposons que le générateur est relié au réseau considéré comme charge.

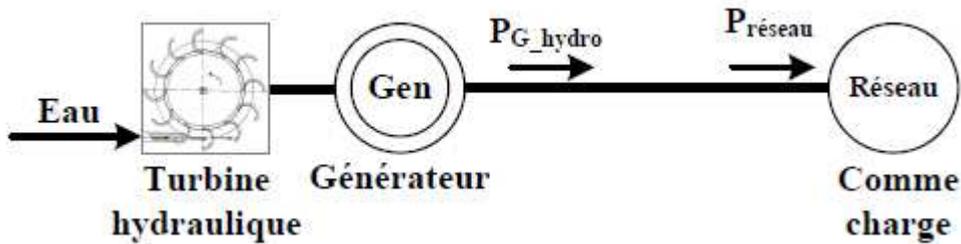


Figure III.2. Configuration du générateur connecté au réseau [NGU11].

2) Le point central est le régulateur de vitesse :

Actions sur les directrices (vannes ajustant le débit et la direction de l'eau sur les aubes de la turbine (de type Francis) pour fournir la puissance active nécessaire afin d'équilibrer la puissance entre production et consommation (Figure III.3) [NGU 11], [WEI 11].

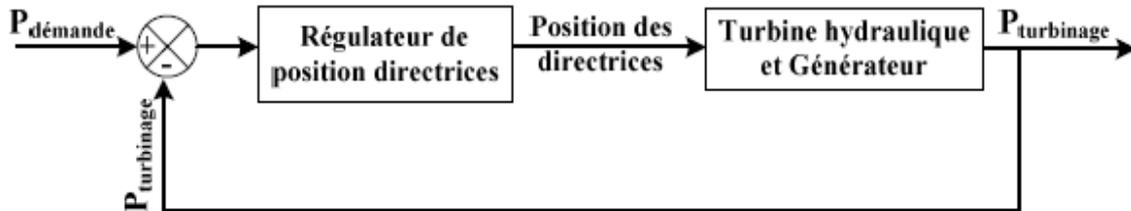


Figure III.3. Diagramme fonctionnel d'une centrale hydroélectrique avec la régulation la position des directrices en fonction de la puissance demande [NGU11].

III.3.2. Modélisation de la turbine hydraulique (turbine Francis)

Plusieurs modèles de turbines existent. La procédure de modélisation va du modèle idéal au modèle de la turbine conçu pour le simulateur. Cette astuce permet sur le plan pédagogique de présenter les modèles des turbines, d'exposer les hypothèses simplificatrices et les limites des uns par rapport aux autres, de valider les résultats partant du modèle de base [WEI 11], [NGU 11].

1) Hypothèses de la modélisation « petits signaux » de la centrale

Nous avons opté pour une approche linéaire, on utilisera donc des modèles linéarisés autour d'un point de fonctionnement. Compte tenu du fait que l'on travaille en régulation et que les grandes variations ne sont pas de mise ici, le modèle linéaire est adapté à l'étude et à la mise en place des commandes bien sûr linéaires. Cependant le point de fonctionnement varie.

Ainsi on sera amené à faire évoluer en conséquence certains paramètres et à choisir des valeurs constantes pour d'autres.

Hypothèses simplificatrices :

- Résistance hydraulique négligeable dans la conduite forcée.
- Eau inélastique.
- Puissance active de sortie de la machine directement proportionnelle à la position des directrices de contrôle de la turbine.
- Dynamique de la charge électrique négligée (modèle statique).
- Le générateur doit assurer que la fréquence reste à l'intérieur de certaines tolérances limites. Le maintien de la fréquence est assuré par un équilibre des puissances actives. En réseau comme en charge isolée, si la génération de puissance active dépasse la consommation, alors la fréquence augmente.

2) Le comportement de la turbine est caractérisé par l'inertie de la transmission de l'eau dans la conduite et par la pression sur les aubes de la turbine.

- ✓ L'inertie dépend :
 - De la longueur et de la section de la conduite.
 - De la vitesse de l'eau.
- ✓ La pression dépend :
 - De la différence de hauteur entre l'entrée de la conduite et sa sortie en régime permanent.
 - De la variation de la vitesse de l'eau en régime transitoire.

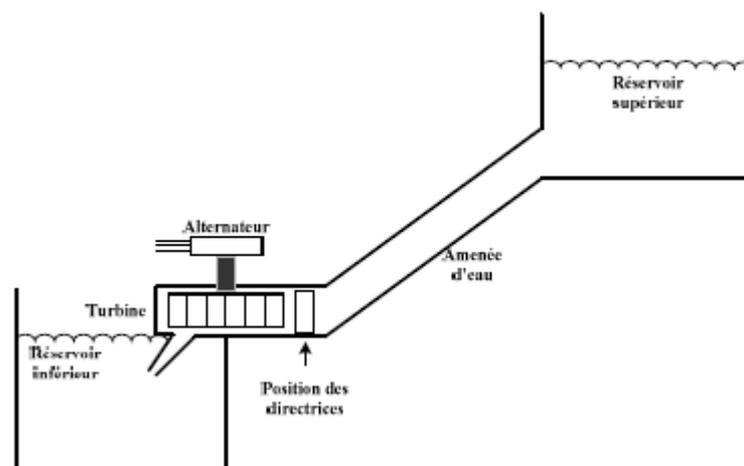


Figure III.4. Centrale hydroélectrique (une seule directrice représentée)

La turbine transforme l'énergie cinétique de transmission de l'eau en énergie cinétique de rotation du rotor.

Le modèle de la turbine comprend la dynamique d'ouverture des vannes d'eau et l'interaction entre l'eau et les aubes.

La puissance de la machine est proportionnelle au produit du débit par la pression.

Lors d'une augmentation rapide de l'ouverture des directrices, l'eau ne peut accélérer immédiatement dans la conduite forcée : le débit est donc constant.

Comme l'ouverture plus grande entraîne une baisse de pression sur les aubes de la turbine, il y a alors une diminution temporaire de la puissance ce qui s'exprime par le zéro « instable » de la fonction de transfert de la formule (Equation. III-10) et de la Figure III.5 [NGU 11].

III.3.3. Les équations de la turbine

De façon générale, le modèle peut être linéaire ou non, simplifié ou non. Les équations régissant les modèles expriment le débit et/ou le couple (puissance en pu) en sortie

(Equation III-1) et (Equation III-2) en fonction de trois paramètres dont: la vitesse de rotation, la pression et la position des directrices. [Jus13]

$$T = T(G, H, \omega) \quad \text{III-1}$$

$$Q = Q(G, H, \omega) \quad \text{III-2}$$

Les équations définissant le modèle idéal sont la vitesse et la puissance (Equation III-3) et la seconde loi de Newton définissant l'accélération de la colonne d'eau (Equation III-4) :

$$\begin{cases} V = K_v G \sqrt{h} \\ P_m = K_p H V \end{cases} \quad \text{III-3}$$

$$\rho L A \frac{d\Delta V}{dt} = -A \rho g \Delta H \quad \text{III-4}$$

$\rho L A$ représente la masse d'eau dans la conduite

Après linéarisation des équations autour d'un point de fonctionnement on obtient :

$$V_0 = K_v G_0 \sqrt{H_0} \text{ Et } P_0 = K_p H_0 V_0 \quad \text{III-5}$$

$$\Delta \bar{V} = \Delta \bar{G} + \frac{\Delta \bar{H}}{2} \rightarrow \Delta \bar{H} = 2(\Delta \bar{V} - \Delta \bar{G}) \quad \text{III-6}$$

$$\Delta \bar{P}_m = \Delta \bar{V} + \Delta \bar{H} = 3\Delta \bar{V} - 2\Delta \bar{G} \quad \text{III-7}$$

En divisant l'équation de l'accélération (III-4) par $A \rho g H_0 V_0$, on obtient :

$$T_w \frac{\delta \bar{V}}{\delta t} = -\Delta \bar{H} \quad \text{III-8}$$

$$T_w = \frac{LV_0}{gH_0} = \frac{LQ_0}{gAH_0} \quad \text{III-9}$$

Généralement, $0.4s \leq T_w \leq 0.5s$ en pleine charge.

Les équations (III-5) à (III-8) ramenées dans le domaine de Laplace permettent d'obtenir :

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \quad \text{III-10}$$

L'indice «o» indique la position stable avant la variation.

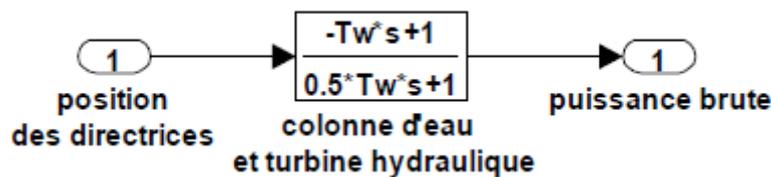


Figure III.5. Modèle colonne d'eau et turbine [NGU 11], [Jus13], [WEI 11].

Où :

T_w est la constante de temps hydraulique :

$$T_w = \frac{Lu_0}{gh_0} \quad \text{III-11}$$

Avec

L : longueur de la conduite forcée [m] ;

u_0 : vitesse initiale de l'eau dans la conduite forcée [m/s] ;

g : accélération gravitationnelle [m/s^2] ;

h_0 :Hauteur de chute initiale [m].

La constante hydraulique est proportionnelle à la position des directrices. Donc, cette constante varie selon la puissance produite par la machine [NGU 11], [Jus13], [WEI 11].

III.3.4. Régulateur PI et système de commande

- L'entrée du régulateur de vitesse PI est la différence entre la vitesse consigne et la vitesse mesurée.
- La sortie (position de directrices): le régulateur actionne une valve pilote qui actionne à son tour le circuit hydraulique permettant d'ajouter ou de soustraire de l'huile dans le servomécanisme de position des directrices.
- Modèle de réglage : la valve pilote est représentée par une fonction de transfert du premier ordre, le servomécanisme représenté par un intégrateur et le statisme par une rétroaction sous forme de gain entre la sortie (position des directrices) et l'entrée (erreur de vitesse).
- Hypothèse simplificatrice : la dynamique d'ouverture des directrices et de la valve pilote est très rapide par rapport au régulateur => simplification de la fonction de transfert du régulateur PI : on néglige la constante de temps de la valve pilote et la dynamique du servomécanisme (cf. Figure III-6).

L'approximation générale faite dans le cas du régulateur PI est que la dynamique d'ouverture des directrices et de la valve pilote est très rapide par rapport au régulateur, ce qui est généralement vérifié. La fonction de transfert du régulateur PI est définie par l'Equation (III-12) si on néglige la constante de temps de la valve pilote, la dynamique du servomécanisme et qu'on distribue le gain de la boucle interne sur K_c et K_i [NGU11].

Fonction de transfert du régulateur PI :

$$G_{PI}(S) = \frac{1}{R} \times \frac{1 + \frac{K_c}{K_i} S}{1 + \left(\frac{1}{RK_i} + \frac{K_c}{K_i} \right) S} \quad \text{III-12}$$

Avec :

K_c : le gain proportionnel [sans unités] ;

K_i : le gain intégral [s^{-1}] ;

R : le statisme [sans unités] ;

K_p : le gain de la valve pilote [s^{-1}] ;

T_p : la constante de temps de la valve pilote [s] [NGU 11], [Jus13].

Régulateur P.I. avec statisme : rétro-action de la position des directrices (mesure indirecte de la puissance fournie) :

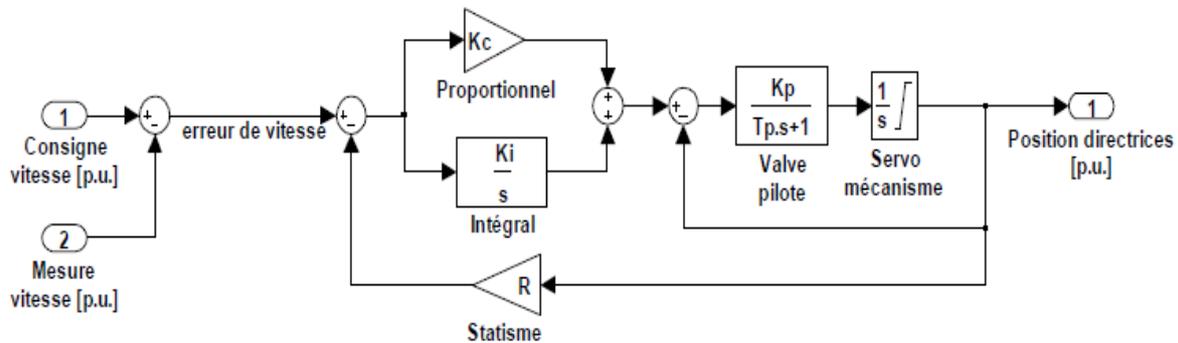


Figure III.6.Diagramme du fonctionnement de régulateur de vitesse proportionnel intégral (PI) [NGU 11].

III.3.5. Réglages du régulateur de vitesse proportionnel intégral (PI)

Les réglages du régulateur PI ont été validés par Wozniac [NGU 11]. Ils s'appuient sur le critère de Paynter. Ils donnent des performances similaires à celles du régulateur mécanique « Classique ». Les réglages sont les suivants:

$$K_p = 0.4 \frac{T_m}{T_w} \quad \text{III-13}$$

Et
$$K_i = 0.08 \frac{T_m}{T_w^2} \quad \text{III-14}$$

Où :

K_p : le gain proportionnel [sans unités] ;

K_i : le gain intégral [s^{-1}] ;

T_m : la constante de temps mécanique [s] ;

T_w : la constante de temps hydraulique [s].

Les gains sont constants et sont calculés pour la valeur maximale de T_w . Ceci assure un fonctionnement stable sur toute la plage de variation autour du point de fonctionnement [NGU 11].

III.3.6. Application à nos travaux: régulation de la position des directrices pour une puissance de turbinage demandé

Lorsque le système fonctionne afin de fournir la puissance au réseau, la position des directrices doit être contrôlée pour réguler le débit de l'eau faisant tourner la turbine pour produire la quantité désirée de la puissance.

L'objectif du modèle est de représenter le transfert de suivi de consigne de puissance.

En tenant compte des différentes hypothèses émises, on aboutit au schéma de transfert ci-dessous (cf. Figure III-7):

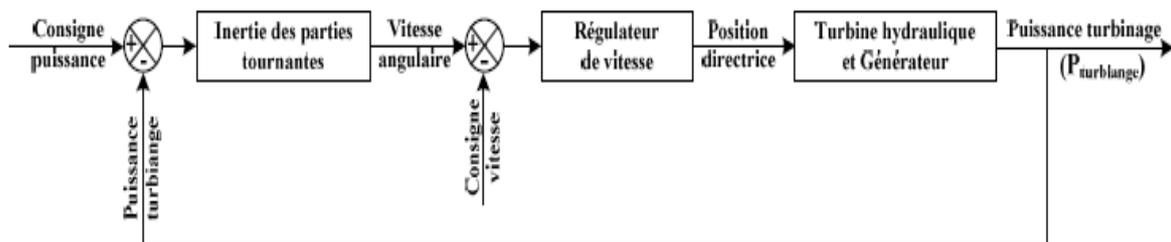


Figure III.7. Bloc diagramme décrivant l'ensemble du processus de régulation du modèle de turbinage [NGU 11].

Ce modèle de turbinage est représenté dans l'annexe 1 sous forme de schéma détaillé et de bloc modèle sur Matlab/Simulink

III.3.7. Résultats

La simulation du comportement de la turbine avec comme entrée la puissance demandée et en sortie la puissance turbinée.

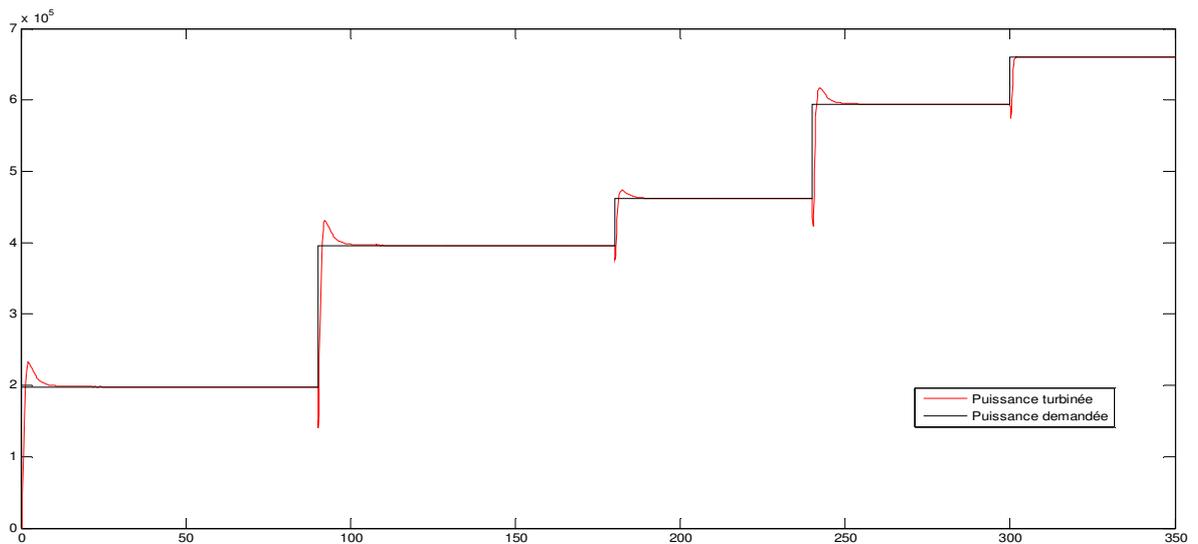


Figure III.8. Puissance de turbinage de sortie suivant la puissance d'entrée demandée

La Figure III.8 montre la réponse du système dans son ensemble muni du régulateur PI choisi plus haut. On remarquera que le système en boucle fermée ne fait pas de dépassements et peut être assimilé à un premier ordre avec une constante de temps d'environ 15 secondes. Aussi, on peut constater l'influence du zéro « instable » de la fonction de transfert de la turbine qui provoque des variations dans le sens inverse à chaque changement de puissance.

Avec ces résultats de sortie du modèle, on trouve que ce modèle peut répondre à des demandes de consigne de puissance grâce au régulateur de la position des directrices. Ce modèle va être intégré au système global en vue de la simulation dynamique.

III.4. Modèle de la station de pompage

III.4.1. Construction de modèle

La Figure III-9 présente le schéma d'une station de pompage, qui a pour mission principale de stocker la puissance abondante du système global sous forme d'énergie potentielle de l'eau dans le bassin supérieur.

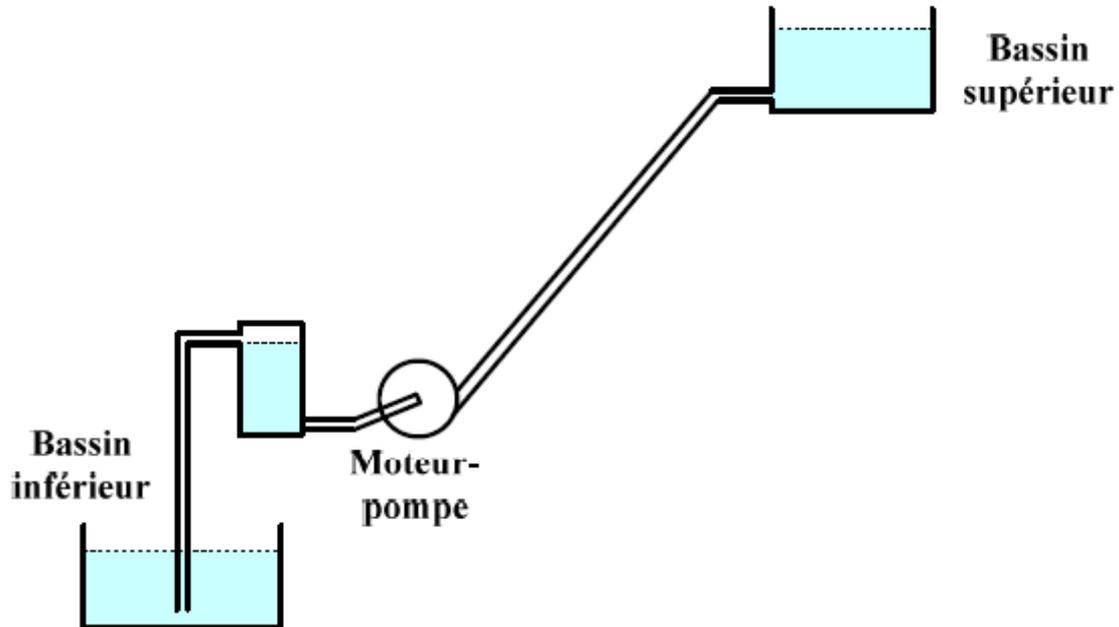


Figure III.9.Schéma d'une station de pompage [NGU 11].

III.4.2. Caractéristiques générales des pompes:

Une pompe est une machine qui communique l'énergie nécessaire à un liquide pour se déplacer dans une canalisation [NGU 11].

Elle est caractérisée par :

- Son débit volumique :

$$Q_v = \frac{V}{t} = v \cdot s \quad \text{III-15}$$

Où :

Q_v : est le débit volumique d'eau [m³/s] ;

V : est le volume d'eau [m³] ;

v : est la vitesse de l'eau [m/s] ;

s : est la section du tuyau [m^2].

- Ses pressions

1) Sa pression au refoulement :

$$H_r = \frac{P_r}{\rho_{eau}g} \quad \text{III-16}$$

Où :

H_r : est la hauteur de l'eau au refoulement [m] ;

P_r : est la pression au refoulement [Pa] ;

ρ_{eau} : est la masse volumique de l'eau = 1000 [kg/m^3] ;

g : est l'accélération de la pesanteur = 9,81 [m/s^2].

2) Sa pression à l'aspiration :

$$H_a = \frac{|P_a|}{\rho_{eau}g} \quad \text{III-17}$$

H_a : est la hauteur d'eau à l'aspiration [m] ;

P_a : est la pression à l'aspiration [Pa] (attention P_a relative négative).

3) Sa hauteur manométrique totale :

$$H_{mt} = H_r + H_a = \frac{P_r + |P_a|}{\rho_{eau}g} \quad \text{III-18}$$

- Sa différence de pression :

$$\Delta P_{pompe} = P_r - P_a = \rho_{eau} \cdot g \cdot H_{mt} \quad \text{III-19}$$

- Sa puissance utile :

La puissance P_u est la puissance récupérée par le liquide grâce à la pompe :

$$P_u = \Delta P_{pompe} \cdot Q_v = Q_m \cdot g \cdot H_{mt} \quad \text{III-20}$$

Avec :

ΔP_{pompe} en [Pa] ;

Q_v en [m^3/s] ;

P_u en [W] ;

Q_m en [kg/s] ;

g en [N/kg] ;

H_{mt} en [m].

- Son rendement :

$$\eta_{pompe} = \frac{P_{u_pompe}}{P_{e_pompe}} \quad \text{III-21}$$

P_{u_pompe} : puissance utile [W] ;

P_{e_pompe} : puissance électrique consommée par la pompe [W] ;

η_{pompe} : rendement du pompage ;

Le rendement du pompage est souvent calculé expérimentalement [NGU11]. Nous avons en moyenne :

- pompe centrifuge $\approx 0,6$
- pompe à piston $\approx 0,6$

Courbes caractéristiques : sur un même graphique, on trace 3 courbes en fonction du débit volumique :

$$H_{mt} = f(Q_v)$$

$$P_{u_pompe} = f(Q_v)$$

$$\eta_{pompe} = f(Q_v)$$

C'est ainsi que l'on déterminera la zone de débit qui donnera le meilleur fonctionnement pour une pompe donnée.

$$P_{e_pompe} = g \cdot \frac{Q_v \cdot \rho_{eau} \cdot H_{mt}}{\eta_{pompe}} \quad \text{III-22}$$

Où :

η_{pompe} est le rendement de la pompe.

L'objet de ce modèle est de calculer la puissance consommée par la pompe et le débit nécessaire pour fournir la puissance de pompage demandée.

III.4.3. Modélisation de la pompe centrifuge

L'expression de la hauteur manométrique totale donnée par le modèle Pleider-Peterman.

$$HMT = \alpha_0 \omega_r^2 - \alpha_1 \omega_r Q - \alpha_2 Q^2 \quad \text{III-23}$$

Avec: $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ des constantes.

En dehors de son fonctionnement la pompe doit convaincre un certain couple résistant qui est donné par :

$$HMT = H_g + P_c \quad \text{III-24}$$

Avec:

H_g : Hauteur à convaincre par la pompe ;

P_c : Les pertes de charges dans les canalisations.

$$P_c = \left(\lambda \frac{D}{d_c} + \xi \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 d_c^4 g} \quad \text{III-25}$$

Où :

λ : Coefficient de régulation de la pression dans la canalisation ;

D et d_c : longueur et diamètre de la canalisation ;

ξ : Coefficient des pertes de pression locales dans les différentes connexions de a canalisation ;

g : Accélération de la pesanteur.

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = k_r \omega^2 \quad \text{III-26}$$

Avec :

$$k_r = \frac{P_n}{\omega_n^3} \quad \text{III-27}$$

Où :

P_n : Puissance nominale du moteur synchrone(W) ;

ω_n : Vitesse nominale du moteur synchrone (rad/s) ;

ω : Vitesse du moteur du moteur synchrone (rad/s).

III.4.4. Application

En vue de valider le modèle de la pompe on a implémenté les équations régissant son système sous Matlab/simulink pour une entrée de vitesse en escaliers.

On obtient le modèle de pompage par Matlab/simulink sous forme de schéma détaillé et de bloc modèle (annexe 2) :

III.4.5. Résultats

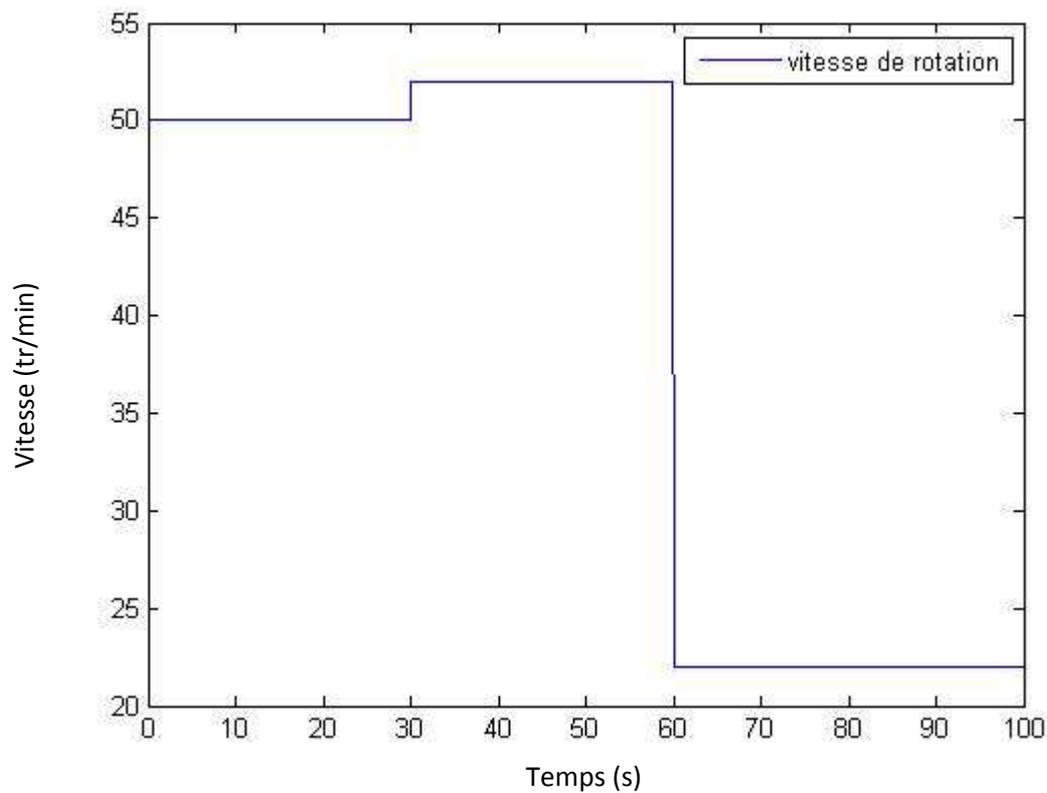


Figure III-9 : La variation de la vitesse à l'entrée de la pompe.

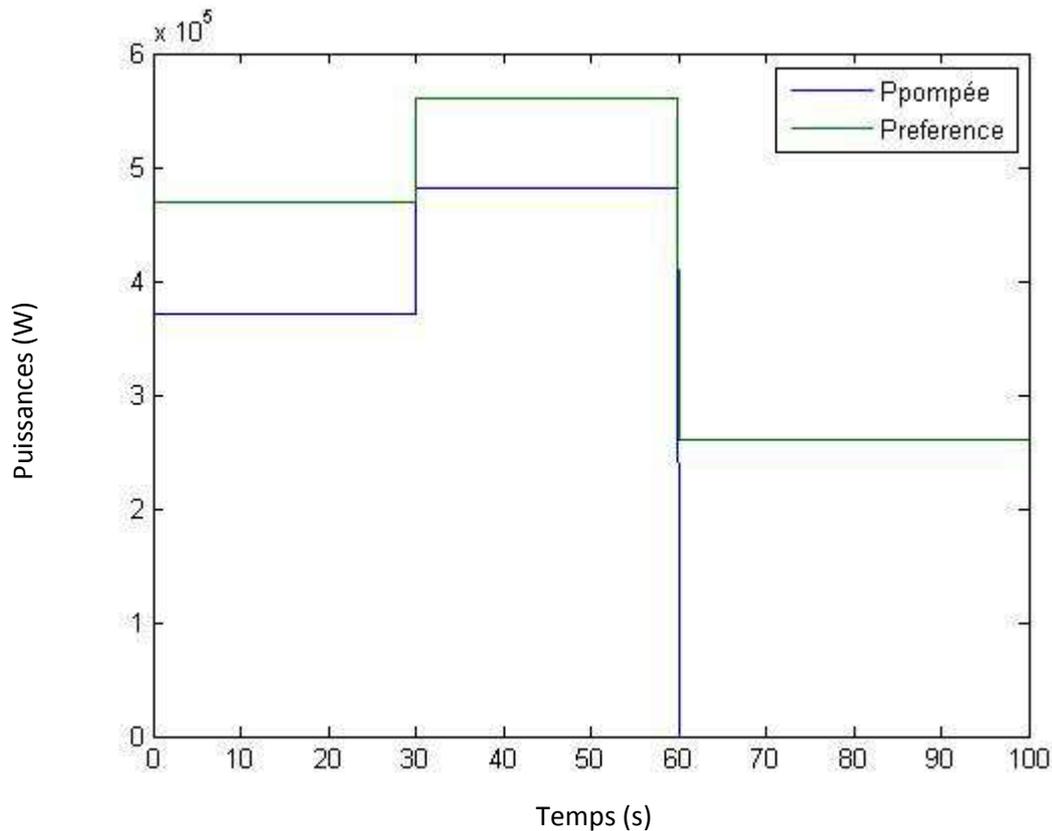


Figure III-10 : Puissance à l'entrée et à la sortie de la pompe.

On voit bien que la pompe délivre une puissance qui suit parfaitement la consigne mais avec un rendement qu'on a considéré étant égale à une constante alors qu'il est caractérisé par une courbe lui aussi. On peut aussi constater que la puissance à la sortie de la pompe (puissance hydraulique) est nulle lorsque l'entrée en vitesse est inférieure à une certaine valeur et cela est dû au fait que la pompe doit convaincre la hauteur géométrique ainsi que l'ensemble des pertes de charge présente dans le circuit hydraulique.

III.5.1. Modèle de la machine synchrone

La solution de la machine à aimants est préférée à une machine synchrone à inducteur avec cage amortisseur car elle ne présente pas de phénomènes transitoires ou sub-transitoires notables. De plus, la machine synchrone à aimants est plus facile à réaliser et possède un meilleur rendement.

Ce type de machine fait partie des machines à champ tournant. Ainsi, du fait de la nature tournante du champ, la modélisation vectorielle est très bien adaptée. Autre point important :

toutes les commandes dynamiques d'une machine synchrone sont des commandes vectorielles et trouvent leurs racines lointaines dans les années '70 [Dan Roy].

III.5.2. Hypothèses simplificatrices

Des hypothèses simplificatrices ont été prises en compte pour la modélisation de la machine synchrone à aimants :

- le bobinage statorique a une répartition des conducteurs telle que la distribution du champ magnétique soit sinusoïdale pour chaque phase (celle-ci est en même temps une contrainte importante pour les constructeurs : elle est donc plus ou moins respectée en réalité à cause des prix de fabrication).
- l'entrefer est régulier, il a une largeur constante (la variation de réluctance due à la présence des encoches du stator et au montage des aimants sur le rotor n'est pas prise en compte).
- pas de saturation : caractéristique du circuit magnétique linéaire (perméabilité du fer infinie).
- les courants forment un système triphasé équilibré [Bel 13].

III.5.2. Modèle dans un référentiel (a,b,c)

La machine (moteur) synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte, au stator, un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électrique (figure III.11) et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

En fonction de la manière dont les aimants sont placés, on peut distinguer deux types de rotors :

- Dans le premier type, les aimants sont montés sur la surface du rotor offrant un entrefer homogène, le moteur est appelé à rotor lisse et les inductances ne dépendent pas de la position du rotor.

- Dans le deuxième, par contre, les aimants sont montés à l'intérieur de la masse rotorique et l'entrefer sera variable à cause de l'effet de la saillance. Dans ce cas, les inductances dépendent fortement de la position du rotor.

Le diamètre du rotor du premier type est moins important que celui du deuxième ce qui réduit considérablement son inertie en lui offrant la priorité dans l'entraînement des charges rapides [Oun 11].

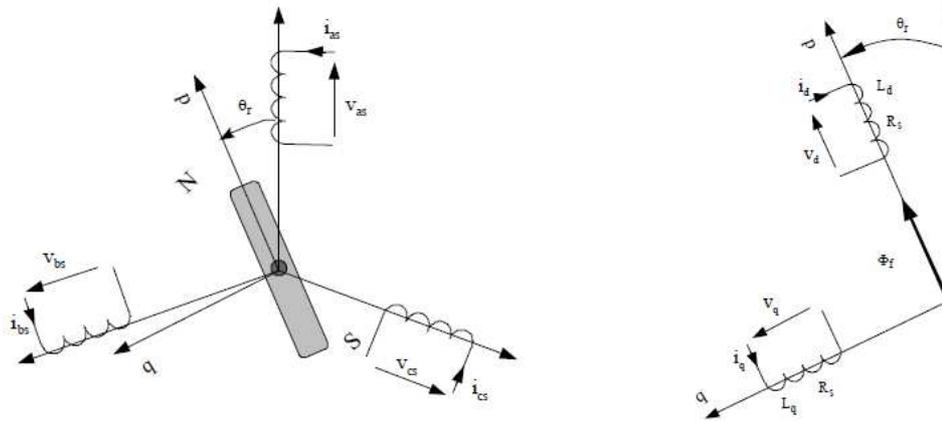


Figure III-11 : Représentation de la machine synchrone dans le référentiel a,b,c et référentiel d,q [RET 08].

Le modèle triphasé s'exprime par :

$$[v_{abc}] = [R] * [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \quad \text{III-28}$$

Avec :

$$[v_{abc}] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, [i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, [\varphi_{abc}] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad \text{III-29}$$

Avec v_{abc} , i_{abc} et φ_{abc} , représentant respectivement les tensions de phases statoriques, les courants des phases statoriques et les flux totaux produits par les courants statoriques. Rest la résistance d'une phase statorique [Oun 11].

La tension d'excitation est donnée par :

$$v_f = R_f + \frac{d}{dt} \varphi_f \quad \text{III-30}$$

Avec φ_f le flux crée par les aimants.

III.5.3. Equation des flux magnétiques

Les équations des flux magnétiques s'écrivent :

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [M_{sf}]i_f \quad \text{III-31}$$

$$\varphi_f = L_f i_f + [M_{fs}][i]_{abc} \quad \text{III-32}$$

Dans une machine à pôles saillants, la matrice des inductances propres statorique est une fonction de la position θ du rotor, elle est de la forme.

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad \text{III-33}$$

- La matrice $[L_{s0}]$ (à coefficients constants) a pour expression :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad \text{III-34}$$

- Les termes de la matrice $[L_{s2}(\theta)]$ sont fonction de l'angle $2p\theta$, elle est donnée par :

$$[L_{s2}](\theta) = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2p\theta) & \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2p\theta) \\ \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2p\theta) & \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{III-35}$$

Le terme L_{s2} est constant.

La matrice de couplage stator-rotor a pour expression :

$$[M_{fs}] = [M_{sf}]^t = M_0 \left[\cos(p\theta) \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad \text{III-36}$$

III.5.4. Equation mécanique

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

$$C_{em} = J \frac{d}{dt} \Omega + C_m \quad \text{III-37}$$

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.

III.5.5. Transformation de Park

La représentation schématique de la machine synchrone équivalente au sens de Park est donnée sur la figure III-12

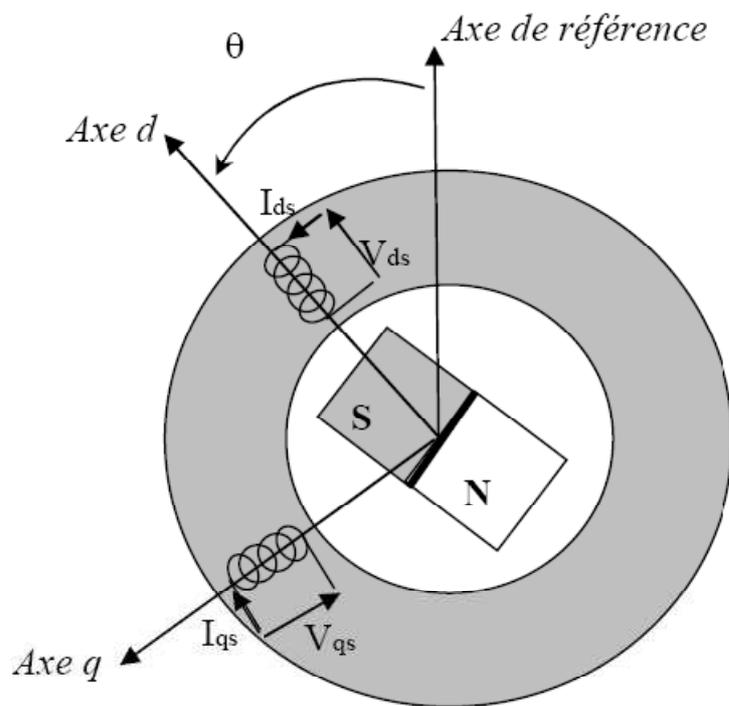


Figure III.12 : Machine équivalente au sens de Park [BAR 15].

III.5.6. 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) :

$[X_{dq}] = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}$: Dans le repère tournant de Park au rotor.

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

$$P(\varepsilon) = C R(\varepsilon) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & -\sin(\varepsilon) \\ \cos\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad \text{III-38}$$

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

$$\begin{cases} [X]_{dq} = P^t(\varepsilon)[X]_{abc} \\ [X]_{abc} = P(\varepsilon)[X]_{dq} \end{cases} \quad \text{III-39}$$

III.5.7. Equation de la machine dans le repère de Park

a) Equation des flux

Les expressions des flux s'obtiennent en partant des équations (III-31) et (III-32) en utilisant les relations de passage (Equation III-39) (On prend $\varepsilon = P\theta$):

$$\begin{cases} \Phi_d = \left(L_{s0} - M_{s0} + \frac{3}{2} L_{s2} \right) i_d + M i_f \\ \Phi_q = \left(L_{s0} - M_{s0} - \frac{3}{2} L_{s2} \right) i_q \\ \Phi_f = M i_d + L_f i_f \end{cases} \quad \text{III-40}$$

$$\text{Avec } M = \sqrt{\frac{3}{2}} M_0$$

On constate que le découpage entre les axes est réalisé et l'angle θ n'apparaît plus dans les équations des flux. Les expressions des inductances directes et quadratiques (L_d et L_q) sont exprimées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} L_d = (L_{s0} - M_{s0}) + \frac{3}{2} L_{s2} \\ L_q = (L_{s0} - M_{s0}) - \frac{3}{2} L_{s2} \end{cases} \quad \text{III-41}$$

b) Equation des tensions

A l'aide des équations (III-28), (III-29) et des relations de passage (Equation III-39), on obtient les équations des tensions comme suit :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d - P\Omega \varphi_q + \frac{d}{dt} \varphi_d \\ V_q = R_s i_d + P\Omega \varphi_d + \frac{d}{dt} \varphi_q \\ V_f = R_f i_f + \frac{d}{dt} \varphi_f \end{cases} \quad \text{III-42}$$

c) Expression du couple électromagnétique

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

$$P = V_f i_f + (V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c) = V_f i_f + (V_d i_d + V_q i_q) \quad \text{III-43}$$

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

$$P_{mec} = P\Omega(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad \text{III-44}$$

L'équation du couple électromagnétique est donc

$$C_{em} = \frac{P_{mec}}{\Omega} = P(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad \text{III-45}$$

Ou encore:

$$C_{em} = P[(L_d - L_q)i_d + M i_f] i_q \quad \text{III-46}$$

On introduisant l'équation (III-46) dans l'équation mécanique (III-37), on obtient :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = P[(L_d - L_q)i_d + Mi_f]i_q - C_m \quad \text{III-47}$$

III.5.8. Modèle d'état de la machine synchrone à aimants permanents

Dans le cas de la machine synchrone à aimant permanents (excitation constante), la troisième expression (tension d'excitation) du système d'équations (III-42) est inutile. Il suffit de poser :

$$Mi_f = \varphi_f \quad \text{III-48}$$

Ainsi les équations des flux direct et quadratique deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \\ \varphi_f = \text{constat} \end{cases} \quad \text{III-49}$$

En introduisant les expressions des flux (Equation III-49) dans les équations de tension (Equation III-42), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + P\Omega \begin{bmatrix} 0 & -L_q \\ L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad \text{III-50}$$

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

$$\begin{cases} e_d = 0 \\ e_q = P\varphi_f\Omega \end{cases} \quad \text{III-51}$$

Le choix de i_d et i_q comme variables d'état dans l'équation (Equation III-50), nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R_s}{L_d} i_d + P \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega + \frac{1}{L_d} V_d \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R_s}{L_q} i_q - P \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega - P \frac{\varphi_f}{L_q} \Omega + \frac{1}{L_q} V_q \end{cases} \quad \text{III-52}$$

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 (Equation III-46) se simplifie en :

$$C_{em} = P\varphi_f i_q \quad \text{III-53}$$

En tenant compte de l'équation mécanique (Equation III-47), l'équation différentielle en vitesse mécanique sera :

$$\frac{d}{dt}\Omega = \frac{1}{J}(P\varphi_f i_q - C_m) \quad \text{III-54}$$

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

$$\Omega = \frac{d}{dt}\theta \quad \text{III-55}$$

Finalement, on obtient le modèle d'état avec i_d , i_q , Ω et θ comme variables :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ \Omega \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + P \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega \\ -\frac{R_s}{L_q} i_q - P \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega - P \frac{\varphi_f}{L_q} \Omega \\ \frac{1}{J} P \varphi_f i_q - \frac{1}{J} C_m \\ \Omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \quad \text{III-56}$$

III.5.9.Principe de la commande vectorielle de la machine synchrone

a)Découplage des courants Id et Iq

Pour commander ce moteur, il est impératif de contrôler le couple, celui-ci dépendant uniquement des composantes des courants statoriques dans le repère d-q donc il faut maîtriser ceux-ci.

Comme il est loisible de le remarquer, les courants Id et Iq dépendent simultanément des grandeurs d'entrée Vd et Vq, nous avons ici un système multi variable 2 entrées 2 sorties couplées. Afin de pouvoir mettre en place des commandes mono variable nous allons à partir des équations régissant le régime dynamique du moteur chercher une contre réaction non linéaire qui découple le système [RET 08].

On a

$$V_d = R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} - \omega_r L_q I_q \quad \text{III-57}$$

$$V_q = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} + \omega_r L_d I_d + \omega_r \cdot \varphi_f \quad \text{III-58}$$

Pour découpler l'évolution des courants I_d et I_q par rapport aux commandes nous allons définir des termes de compensation E_d et E_q tel que :

Pour la première composante du courant statorique nous aurons:

$$V_d + \omega_r \cdot L_q \cdot I_q = R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} = V'_d = V_d - E_d \quad \text{III-59}$$

$$\text{Avec} \quad E_d = -\omega_r \cdot L_q \cdot I_q = -\omega_r \cdot \varphi_q \quad \text{III-60}$$

Pour la seconde composante il vient :

$$V_q - \omega_r L_d I_d - \omega_r \cdot \varphi_f = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} = V'_q = V_q - E_q \quad \text{III-61}$$

$$\text{Avec} \quad E_q = \omega_r L_d I_d + \omega_r \cdot \varphi_f = \omega_r \cdot \varphi_d \quad \text{III-62}$$

Avec les nouvelles entrées V'_d et V'_q nous pouvons à partir des équations différentielles définir les transmittances mono variables :

$$\frac{I_d(p)}{V'_d(p)} = \frac{1}{R_s + L_d \cdot p} \quad \text{III-63}$$

$$\frac{I_q(p)}{V'_q(p)} = \frac{1}{R_s + L_q \cdot p} \quad \text{III-64}$$

Avec ce découplage nous obtenons le schéma bloc suivant :

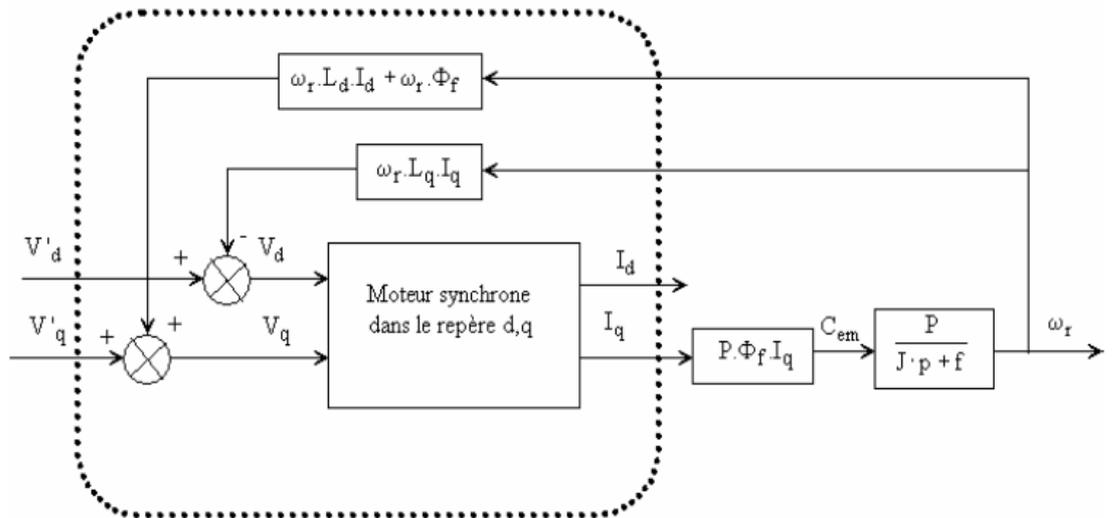


Figure III-13 : Découplage de la machine synchrone à aimants [RET 08].

Le moteur et son découplage revient donc à avoir 2 transmittances du premier ordre dont les nouvelles grandeurs de commande sont V'_d et V'_q , le schéma bloc devient alors :

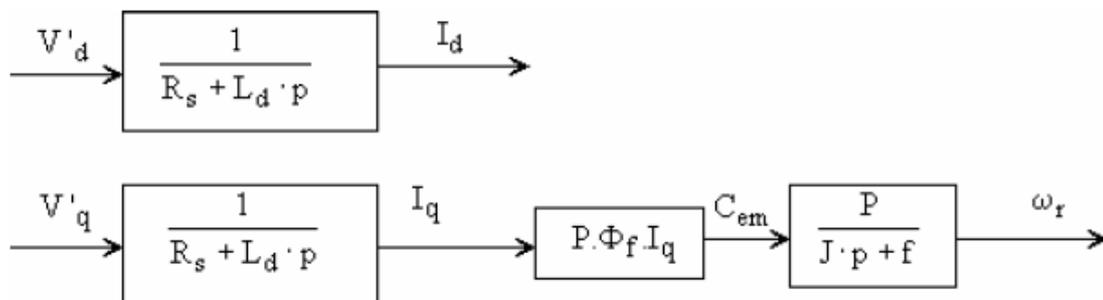


Figure III-14 : Comportement de la machine synchrone avec découplage [RET 08].

b) Commande de la machine synchrone à aimants

-Boucle de commande

Pour piloter les deux courants I_d et I_q il est nécessaire de faire la synthèse des correcteurs K_d et K_q . Ceux-ci étant définis, un troisième correcteur K_w assura la commande de la vitesse en fournissant la consigne de couple (référence de I_q) [RET 08].

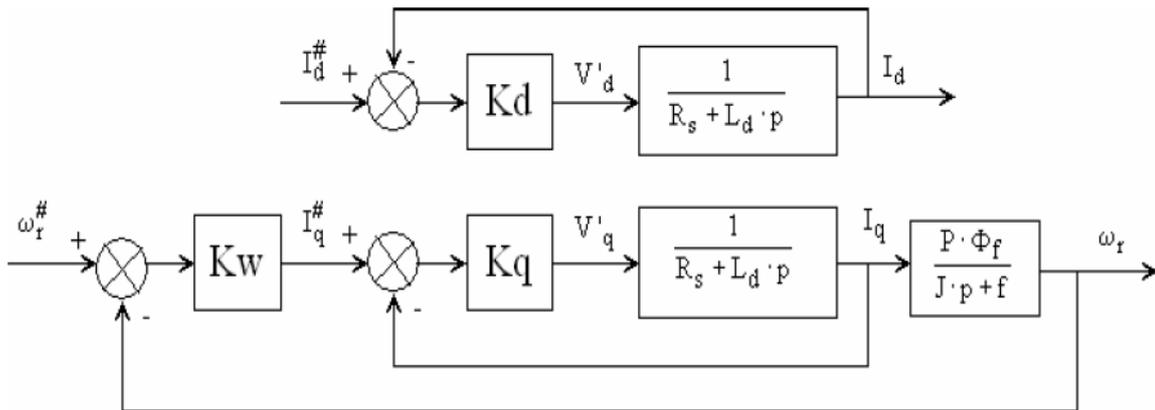


Figure III-15 : Boucle de commande [RET 08].

III.5.10. Simulation de la machine synchrone à aimants permanents avec la commande vectorielle

Le schéma de la machine synchrone et de sa commande sont données en annexe et les résultats de la simulation pour une entrée qui est la différence entre la puissance de la source renouvelable qui délivre une puissance fluctuante et la référence du réseau qui demande une puissance fixe, cette différence est illustrée comme une fonction en escalier.

III.5.10.1. Résultats

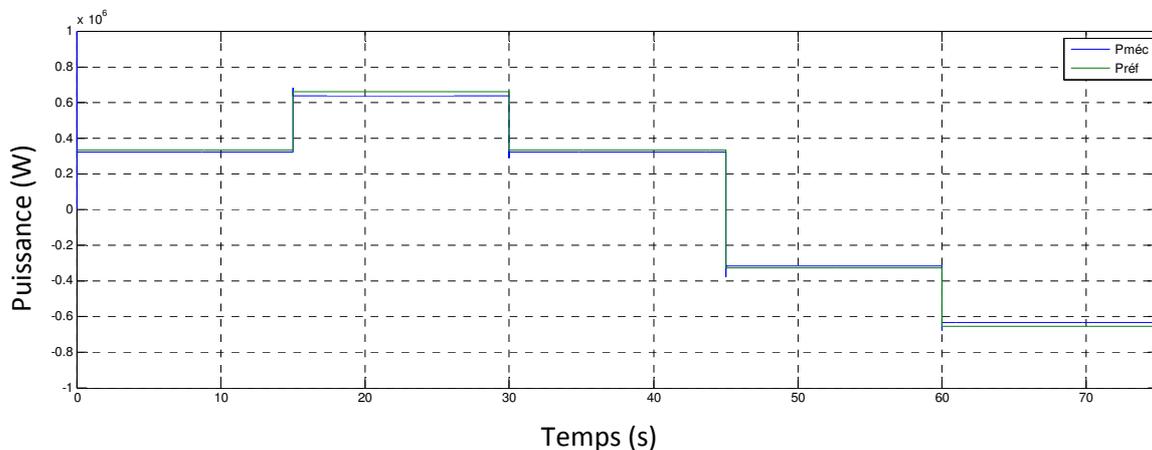


Figure III-16 : Puissance à l'entrée et à la sortie de la MSAP

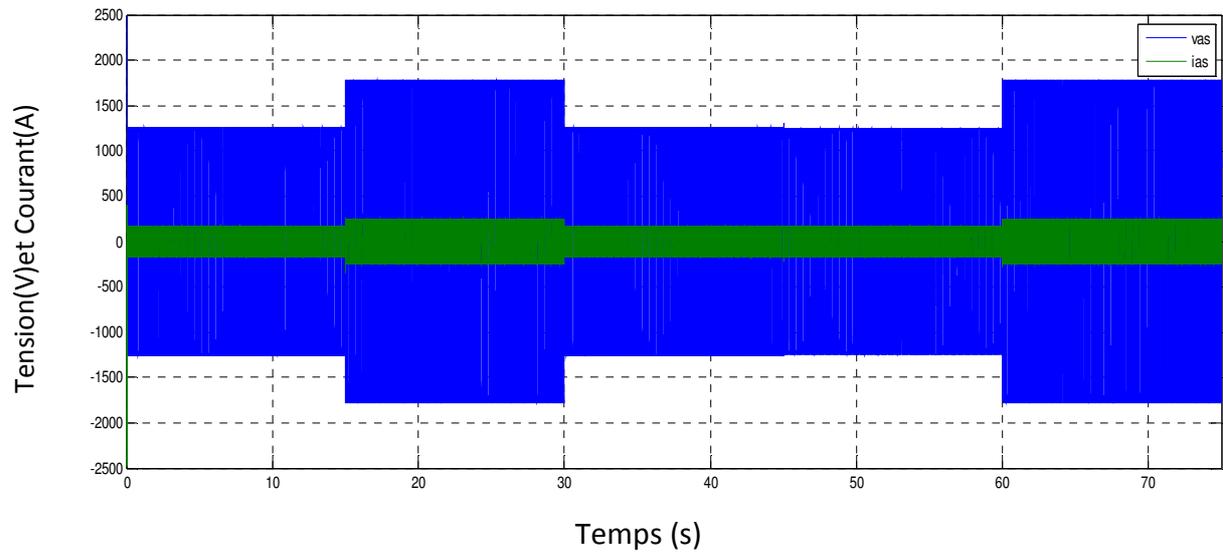


Figure III-17 : Allure des courants et tension de la machine synchrone à aimant permanent.

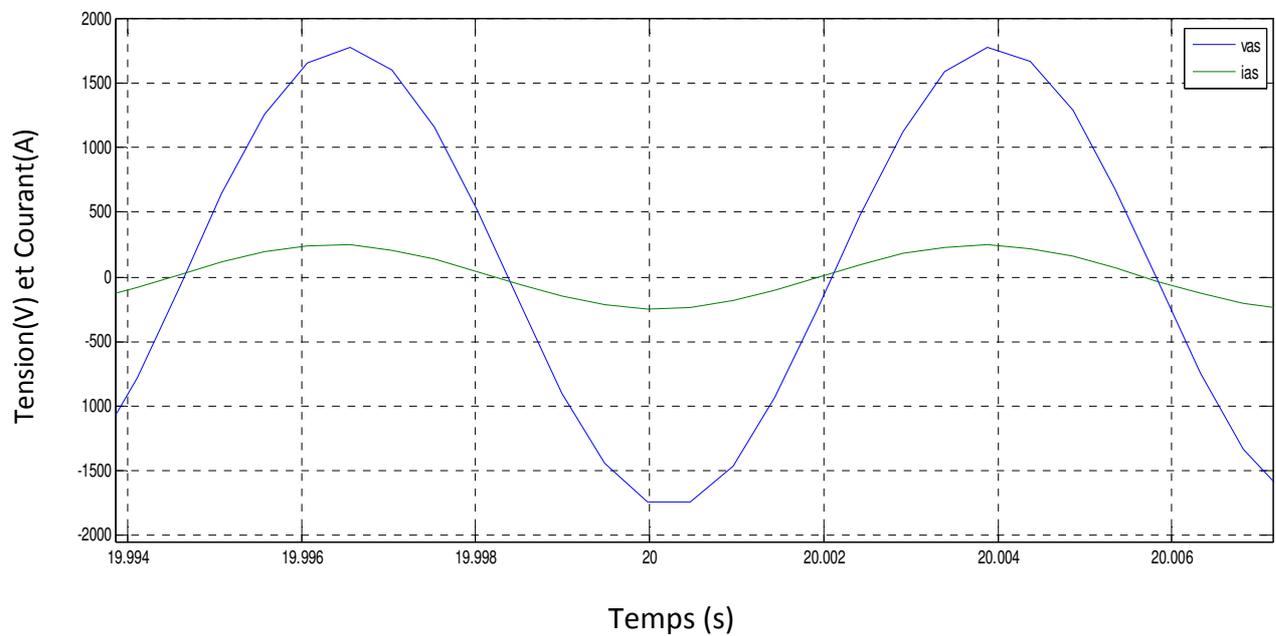


Figure III-18 : Agrandissement sur les tensions et courants en mode moteur (la machine synchrone absorbe de la puissance électrique).

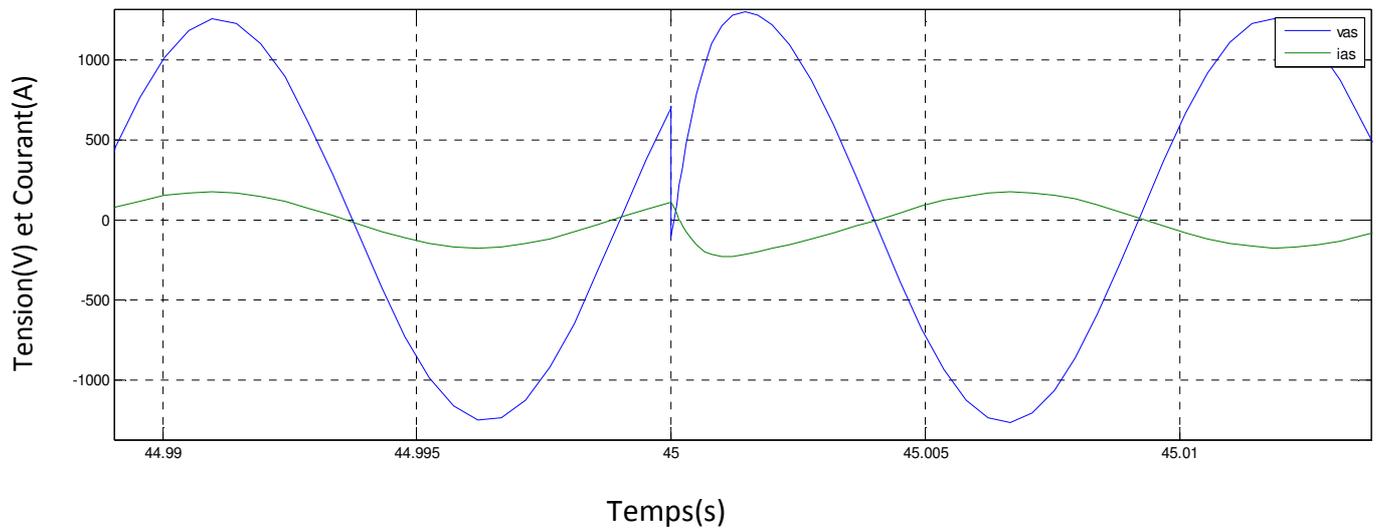


Figure III-19 : Agrandissement sur les tensions et courants en mode génératrice (la machine synchrone absorbe de la puissance mécanique).

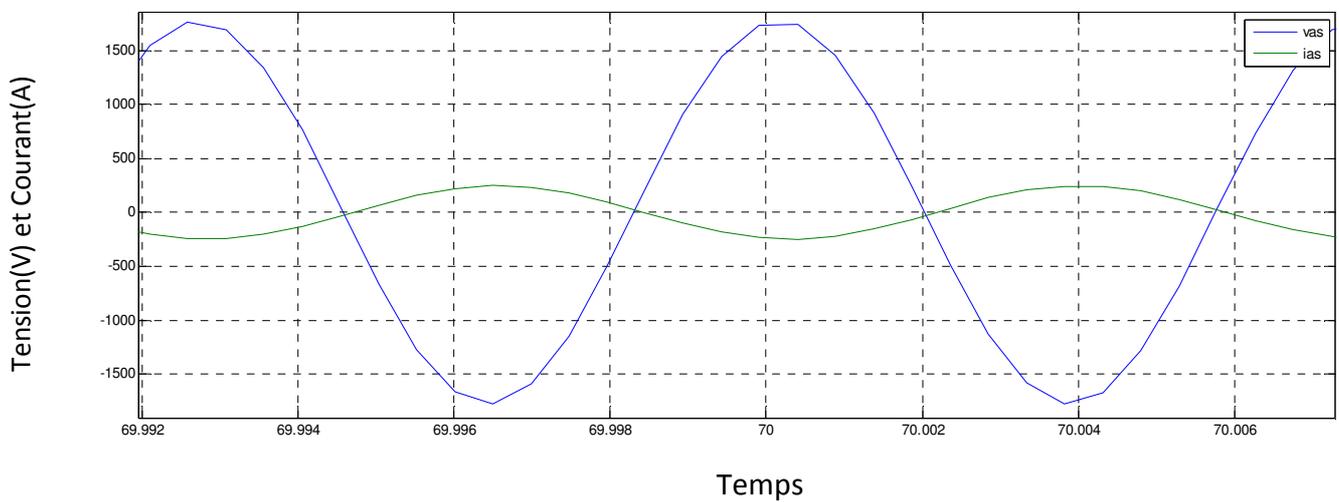


Figure III-20 : Agrandissement sur les tensions et courants au moment de la transition entre le mode moteur et le mode génératrice.

III.5.11. Interprétation des résultats :

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est commandé en puissance et la l'asservissement est établie sachant qu'on a considéré un rendement de 97%. On a essayé de faire des agrandissements sur les différentes phases de fonctionnement et on constate qu'il n'y a pas de phénomènes transitoires notable ainsi le modèle de la MSAP peut servir de moteur pour la pompe comme de génératrice pour la turbine.

III.5.12. Conclusion

Dans ce chapitre, on a modélisé en premier lieu la turbine hydraulique avec ces différentes composantes puis on a simulé son fonctionnement avec un signal d'entrée qui représente la puissance que la turbine doit fournir à la MSAP.

De même pour la pompe ou on a choisi un modèle de Pleider-Peterman pour modéliser le fonctionnement de la pompe puis on l'a implémenté et simulé

En dernier lieu, on a modélisé la machine synchrone a aimants permanents ce qui nous a permis de déterminer son comportement dynamique, par simulation numérique, par application de la commande vectorielle en puissance dans les deux modes de fonctionnement (moteur et génératrice).

Dans la suite de notre travail, nous allons considérer le système global afin d'émuler le fonctionnement d'une station de pompage turbinage a vitesse variable, ce qui fera l'objet du chapitre 04.

Principe de stockage de l'énergie par pompage-turbinage

Chapitre IV : Principe de stockage de l'énergie par pompage-turbinage

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on va regrouper tous les sous-systèmes modélisés dans les parties antérieures pour émuler le fonctionnement d'une station de pompage-turbinage à vitesse variable.

Le but principal de la structure étudiée est le lissage de puissance donc on aura d'une part la puissance produite par la source d'énergie renouvelable et qui sera fluctuante et d'autre part la puissance dans ce cas d'une charge isolée ou d'une connexion au réseau de distribution conventionnel. La figure IV.1 illustre le principe du système étudié.

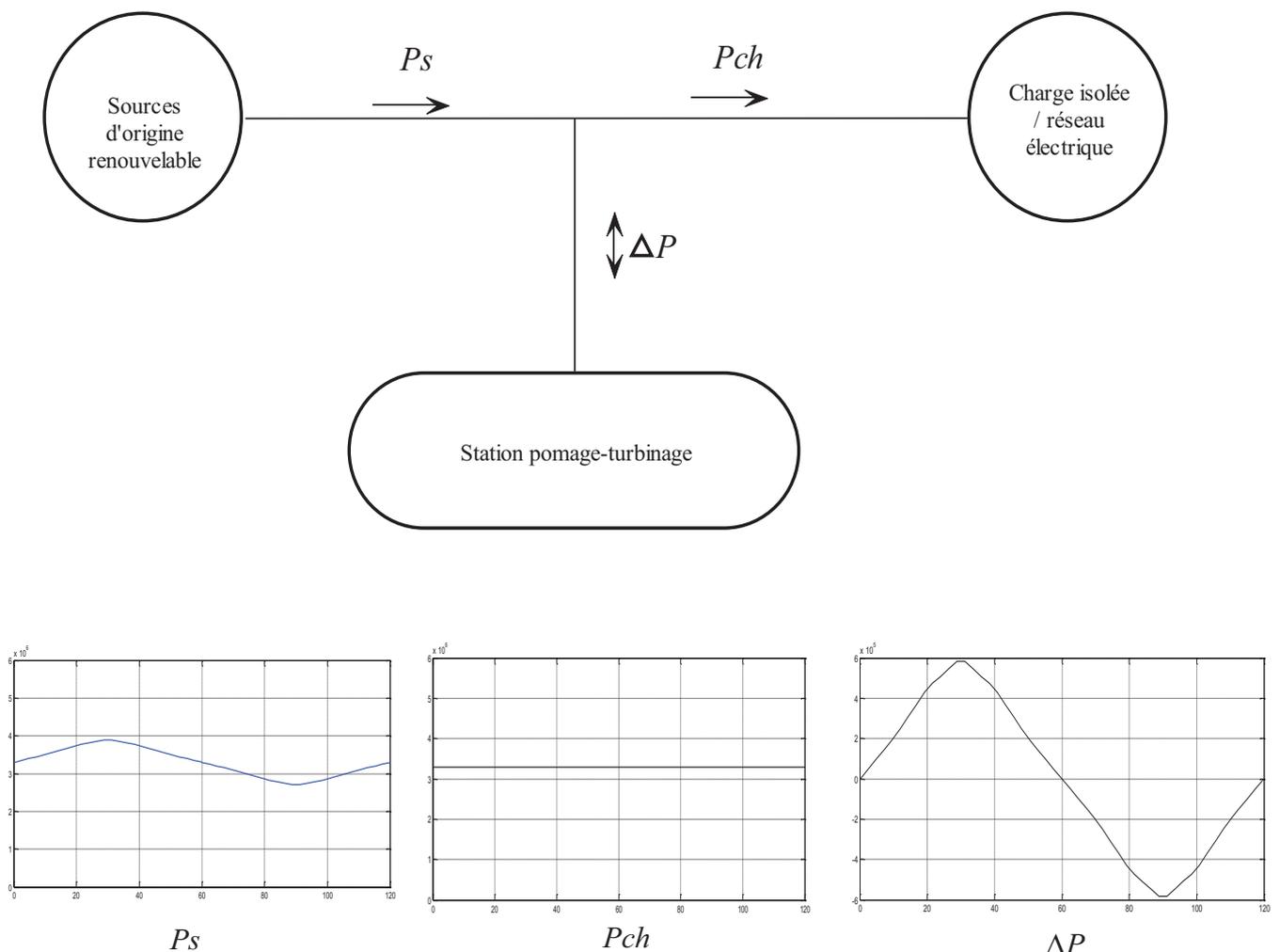


Figure IV.1. Schéma de principe d'une STEP

Principe de stockage de l'énergie par pompage-turbinage

L'ordre de grandeur des puissances illustré dans la figure ci-dessus et le suivant :

La source d'énergie renouvelable délivre une puissance qui fluctue autour de 3.3MW.

La charge isolée consomme une puissance fixe de 3.3MW.

La centrale de pompage turbinage serait capable de gérer une variation de puissance de 20% de la puissance maximale consommé par la charge ce qui vaut 660KW.

Les bassins d'eau seront dimensionner de ce fait selon la durée considéré de fluctuation de la source renouvelable.

IV.2. Système de stockage turbinage

La centrale hydroélectrique considéré dans ce travail se composera d'une machine synchrone à aimants permanents qui fonction en moteur dans le mode pompage et en génératrice en mode turbinage qui est accoupler a une pompe turbine réversible de type Francis.

Le mode pompage se déclenchera des que la puissance produite par la source renouvelable est supérieur à la puissance de la charge qui est considéré fixe. De même le mode turbinage sera opérationnel lorsque la puissance demandé par la charge est supérieur à la puissance produite par la source renouvelable.

Le système est donc réversible et le transit de puissance se fait dans les deux sens, le mode de fonctionnement est définit selon la différence de puissance entre la source a énergie renouvelable et la charge.

Lorsque la différence de puissance est positive il faut extraire de l'énergie électrique qui sera consommée par le moteur qui délivrera une puissance mécanique sur l'arbre ou est couplé la pompe qui à son tour transforme cette énergie mécanique en énergie potentielle en élevant de l'eau du bassin inférieur au bassin supérieur. Lorsque cette différence est négative il faut compenser l'énergie manquante a la source d'énergie renouvelable pour atteindre la valeur demande par la charge alors on turbine l'eau du bassin supérieur au bassin inférieur à travers une conduite forcé la turbine transformera l'énergie de la masse d'eau qui est sous forme de pression à une énergie mécanique sur l'arbre, le moteur à son tour transforme cette énergie mécanique de rotation en une énergie électrique qui vient compenser le manque de puissance et satisfaire la consigne de puissance décrite par la charge.

Principe de stockage de l'énergie par pompage-turbinage

Notre système sera commandé alors en fonction de la différence de puissance entre la source et la charge pour cela on a généré un signal pour émuler cette différence de puissance dans les deux sens, ce signal varie de zéro à la valeur maximale de puissance qui est de 660KW dans les deux phases de fonctionnement pompage et turbinage (puissance positive puis négative) ce fonctionnement peut être répéter sur plusieurs séquences mais pour nous on a la fait une seul fois (pompage puis turbinage)

La MSAP est alimenté normalement par un onduleur mais faute de temps on a du se passer de l'onduleur et alimenter la MSAP directement avec les tensions de références.

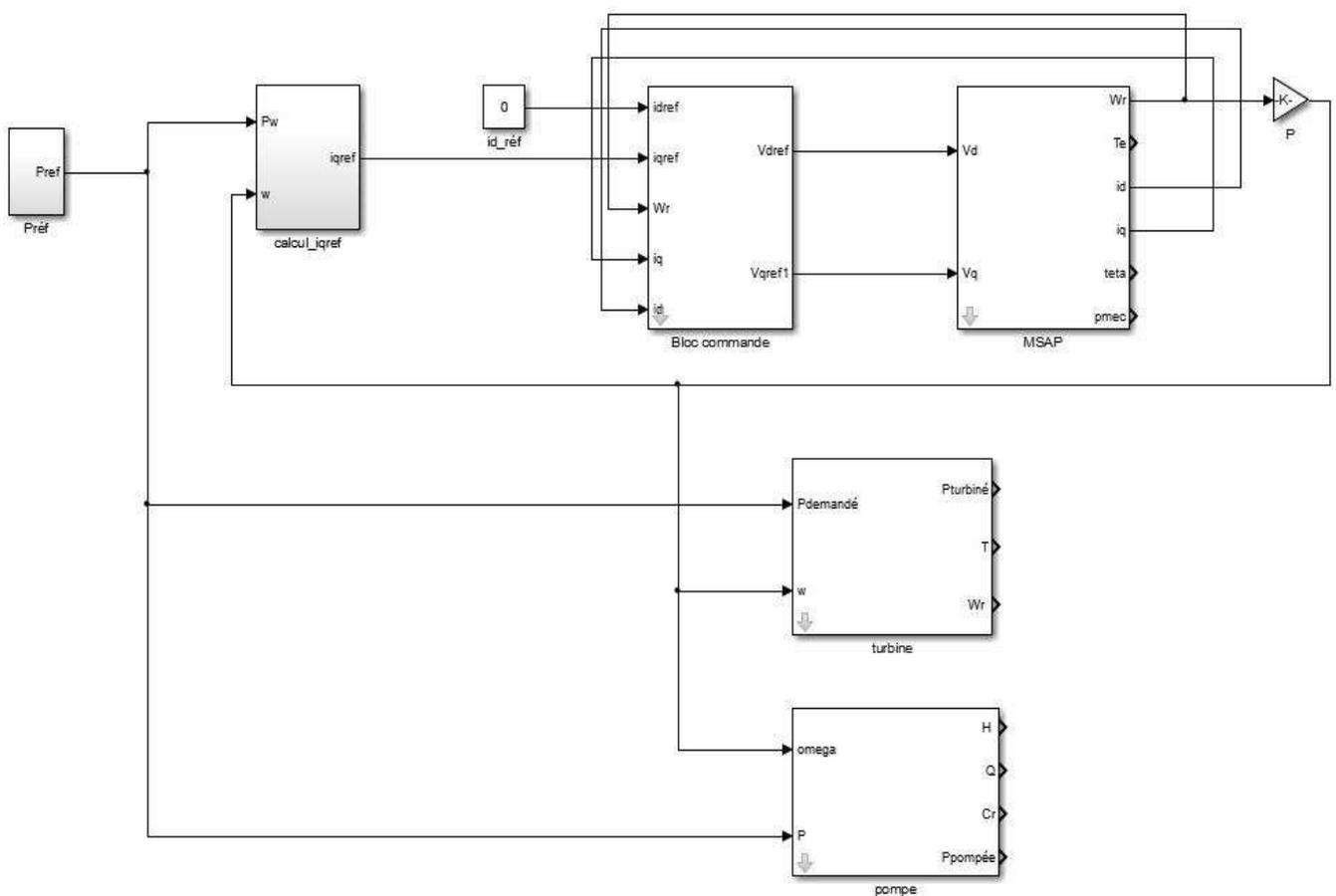


Figure IV.2. Schéma globale de la centrale de pompage turbinage a vitesse variable implémenté sous Matlab/Simulink

Principe de stockage de l'énergie par pompage-turbinage

IV.3. Résultats de simulation et interprétation

Pour un signal d'entrée qui constitue la différence de puissance comme expliqué dans le paragraphe précédent on a pu relever les résultats suivants :

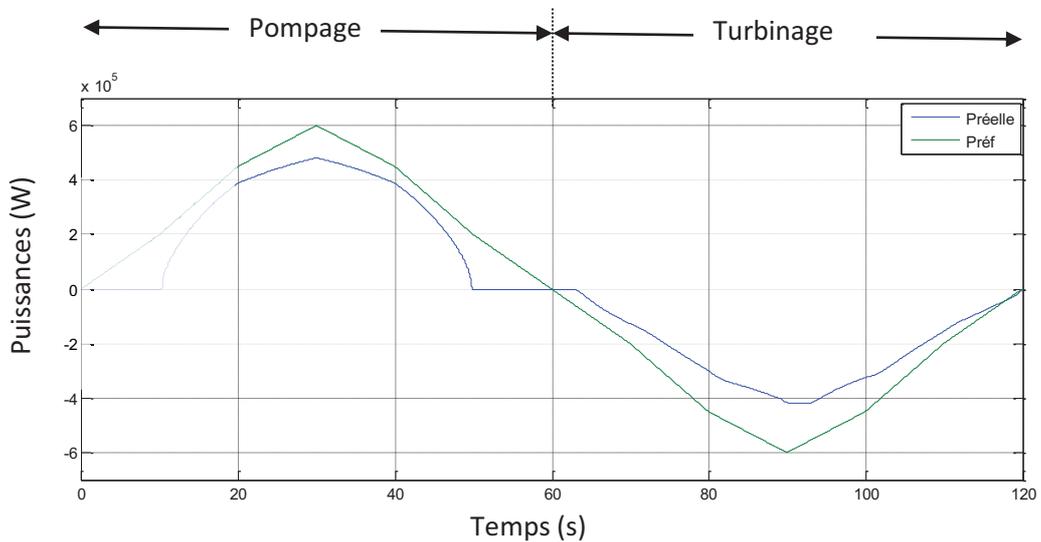


Figure IV.3 : Allures des puissances (de référence, de pompée ou de turbinée)

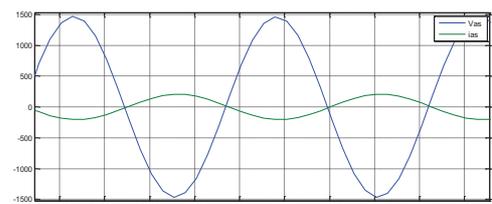
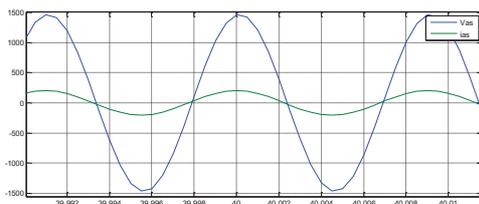
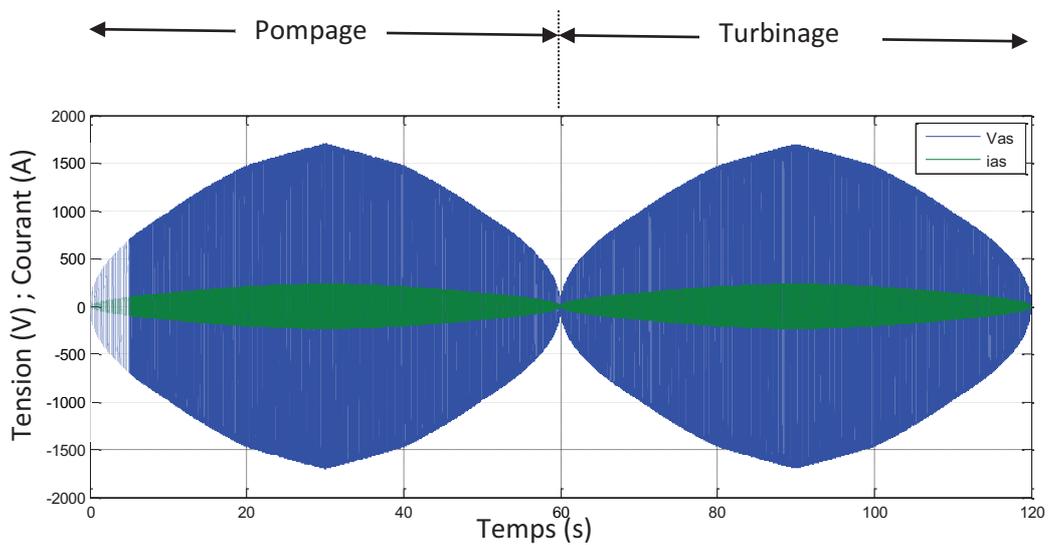


Figure IV.4 : Allures de la tension et du courant de la première phase de la machine

Principe de stockage de l'énergie par pompage-turbinage

D'après ces résultats on remarque qu'en mode pompage la puissance pompée suit la puissance de référence sachant qu'on a pris compte du rendement et comme on l'a déjà montré dans le chapitre précédant que la pompe ne fonctionne pas quand la vitesse est inférieure à un certain seuil donc quand la puissance absorbée à l'entrée de la MSAP est inférieure au seuil correspondent sinon le surplus est consommé et transformé en énergie gravitationnelle.

En mode turbinage la puissance turbinée est sensiblement proportionnelle à la puissance demandée ce qui peut être expliqué par le rendement pris en compte.

On voit bien qu'en mode pompage le courant et la tension sont en phase ce qui donne une puissance positive (fonctionnement moteur) et qu'en mode turbinage le courant et la tension sont en opposition de phase ce qui implique une puissance négative (fonctionnement génératrice).

Comme la MSAP est alimentée par les références de tensions, les tensions et courants sont parfaitement sinusoïdales ce qui en présence de l'onduleur serait plutôt haché et la puissance aurait des ondulations autour des valeurs obtenues sans l'onduleur par ce qu'il est considéré à rendement unitaire mais on précise quand même qu'en présence de l'onduleur les tensions de référence seront comparées à des porteuses dans la MLI triangulo-sinusoïdale, mais comme la MSAP doit fonctionner à vitesse de synchronisme et le système fonctionne à vitesse variable on est ramené à travailler à fréquence variable de ce fait la porteuse doit évoluer avec le signal de référence en amplitude et en fréquence pour qu'il y ait intersection tous les temps suivant l'indice de modulation m et le coefficient de réglage r .

VI.4. Conclusion

La centrale de pompage-turbinage fonctionnant à vitesse variable est arrivée à lisser la puissance en mode pompage plutôt qu'en mode turbinage et permettre une bonne insertion de la puissance issue d'une source d'énergie renouvelable et cela a des exceptions près de quoi on n'a pas simulé toute la partie constituante de la centrale (modèle de la conduite forcée, de l'onduleur ...) un modèle plus complet serait contraint à des conditions supplémentaires.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail est consacré à l'étude d'une centrale hydraulique à vitesse variable comme système d'appui pour les sources de production d'énergie électrique à base d'énergie renouvelable et permettre une meilleur insertion pour cette énergie.

Le premier chapitre nous renseigne sur l'hydroélectricité dans le mode, les systèmes de stockage en générale, et les stations de transfert d'énergie par pompage en particulier.

Le second chapitre nous donne une description de la centrale et les principales parties la constituant, comme on trouve les solution technique pour l'accouplement des composantes mécanique du système, puis on a parlé sur la machine synchrone à aimants permanents en générale et on a terminé par donner la structure retenue dans le cadre de notre travail.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation puis la simulation des parties principales commençant par la turbine hydraulique, la pompe, et la MSAP avec sa commande vectorielle. Chacune des trois composantes est simulées seul en vue d'une simulation globale regroupée.

Le dernier chapitre est une application de l'idée générale d'une centrale hydraulique à vitesse variable, dans la mesure du possible et du temps disponible, ou on a émulé le fonctionnement avec un signal de la source à énergie renouvelable fluctuant, une charge isolé qui demande une puissance constante et notre système au milieu qui gère ces fluctuations.

Les résultats obtenue à la fin du dernier chapitre sont satisfaisants vue que la centrale arrive à compenser l'énergie électrique lorsque la source n'arrive pas à produire assez d'électricité et absorbe le surplus de puissance quand il y a un excès de production mais d'éventuelles améliorations reste a apporté, comme il manque quelques composantes comme l'onduler et le redresseur ainsi que le modèle de la conduite forcée et aussi le modèle des bassin en vue d'une étude énergétique pour dimensionnement des bassin.

Une commande MLI des convertisseurs de puissance permettra le transit de puissance entre la centrale et le réseau mais le rendement et la qualité de l'énergie seront affectés et une contrainte supplémentaire serra ajouté vue que le signale serra polluer en harmonique.

Le système étudié peut être associé à une source d'énergie renouvelable mais débitant sur le réseau et dans ce cas on peut prévoir aussi une gestion optimiser basé sur les prédictions

Conclusion générale

météorologiques ou bien associé à une type précis de source à énergie renouvelable comme l'éolien ou le photovoltaïque.

Références

[**ABD 11**] : R.Abdessemed, "Modélisation et simulation des machines électriques", Edition ellipses, mai 2011

[**Act**] Dictionnaire environnement Avril 2017 .Site internet : https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/centrale_hydroelectrique.php4

[**Ama 01**] Y. Amara "contribution à la Conception et à la Commande des Machine Synchrone à Double Excitation Appliquée au Véhicule Hybride", Thèse de Doctorat, Université Paris, France, Décembre 2001.

[**AMI12**] : H. Amimeur, "Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile", Thèse de doctorat en science de l'université de Batna, 2012.

[**AUS 04**] Modelling of Transient Behaviour in a Francis Turbine Power Plant by Tzoo Bin Ng, G.J. Walker and J.E. Sargison 15th Australasian Fluid Mechanics Conference The University of Sydney, Sydney, Australia 13-17 December 2004

[**BAR 15**] BARDADI BENDAHA Mansour thèse Magister en électronique thème: Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel, soutenue le 04/02/2015

[**Bel 13**] Lakhdar Belhadji. Thèse de doctorat à l'université de Grenoble : Optimisation du contrôle commande d'un système hydraulique réversible _a vitesse variable. Soutenue publiquement le 08/07/2013.

[**Blo 00**] Gino BLOMAERT Thèse de doctorat a L'école polytechnique de LAUSANE : Etude de comportement dynamique des turbines Francis : contrôle actif de leur stabilité de fonctionnement.

[Bre 08] Stefan Breban « *Etude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable* » thèse de doctorat à l'Ecole Supérieure d'Arts et Métiers, soutenu publiquement le 12-12-2008.

[Clerc] Cours commande vectorielle des machines alternatifs Gey Clerc.

[Dan Roy] Cours Daniel Roye, "Modélisation des composantes et des systèmes", document pédagogique : cours 3^{ème} année ENSE3 (Grenoble), option SEM.

[Eco] Consulté en Avril 2017 site: <http://www.ecosources.info/actualites/390-el-hierro-une-ile-independante-en-energie-renouvelables>

[EDO 06] Edouard Laroche cours Modélisation et commande des systèmes électriques site : <http://eavr.u-strasbg.fr/perso/edouard/Student/>

[Ele 12] Butin d'Electro suisse Février 2012 écrit par François. Avellan : Evolution des groupes de pompage turbinage. Bulletin SEV/VSE 2/2012, 2012. Consulté 04/2017 site internet: https://www.electrosuisse.ch/uploads/media/1202_Seite_037-041.pdf

[Ele 15] Butin d'Electro suisse Février 2015 écrit par S Gabathuler, D Pavanello, C Münch - Bulletin SEV/AES, 2015 .consulté le 02 Mai 2017 au lien suivant: <https://www.hevs.ch/media/document/0/le-pompage-turbinage-a-petite-echelle-une-solution-envisageable.pdf>

[Goud] Livre petite centrale hydroélectrique référence N° 22290. GOUDLIN page 51-87et88

[GRU] GRUNDFOS DATA BOOKLET, HS, Horizontal split case pumps, 60 Hz, [http://www.grundfoss.dk/Web/HomeKR.nsf/GrafikOpslag/hscatalogue/\\$File/HS%20%EC%8B%9C%EB%A6%AC%EC%A6%88.pdf](http://www.grundfoss.dk/Web/HomeKR.nsf/GrafikOpslag/hscatalogue/$File/HS%20%EC%8B%9C%EB%A6%AC%EC%A6%88.pdf).

[Jea 99]: Jean Paul L., Claude B., (Commande Numérique des Machines Synchrones),
Technique d'ingénieur, Référence D3644

[Jun 04] thèse le marche de l'hydroélectricité dans le monde JUNIUS Adrien DESS
Economie et Politique de l'énergie, soutenue le 30/10/2004

[Jus 13] JUSTE TSOTIE W AMBA, modélisation et implémentation numérique du
simulateur analogique de la centrale Hydro-Québec. Décembre, 2013.

[Laval] Turbine en bref LAMH Laboratoire de machine hydraulique université de Laval
04/2017. Disponible au site internet: <http://lamh.gmc.ulaval.ca/turbines-en-bref/turbine-francis/>

[Moh 03] Mohan N., (First Course on power Electronics and Drives), Département du Génie
Electrique et Informatique, Université de minnesota, Eddition MNPERE, USA, 2003.

[MOU 14] Simulation Model of Hydro Power Plant Using Matlab/Simulink by Mousa
Sattouf. Int. Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.com ISSN : 2248-
9622, Vol. 4, Issue 1(Version 2), January 2014, pp.295-301

[NGU 11] Optimisation de systèmes de production intermittents non conventionnels couples
au réseau électrique HAL archives écrit par Phuc Diem Nguyen Ngoc

[Oun 2011] OUNNAS, Djamel (2011) *Commande d'une machine synchrone à aimants
permanents via des modèles flous de Takagi-Sugeno*. Masters thesis, Université Mohamed
Khider - Biskra.

[Pai 02] O. Paish, "Micro-hydropower: status and prospects", 2002, special issue paper

[Pac-B] '*Petites centrales hydrauliques – les turbines hydrauliques* ' rapport Programme
d'action PACER – Energies renouvelables en suisse ISBN 3-905232-55-3

[Pou 95]: Poul C.K., Oleg W., Scott D.S., (Analysis of Electric Machinery), IEEE Press, New
York, 1995.

[RET 08] Cours commande vectorielle des machines asynchrone et synchrone J.M RETIF
2008 Istitut National des Sciences Appliqué Lyon.

[REV 14] Review of Hydropower Plant Models by A.Acakpovi, E. Ben Hagan and
F.X.Fifatin International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 108 –
No 18, December 2014

[Roc] Rocky River Pumped-Storage Hydroelectric Station, A National Historic
Mechanical Engineering Landmark, The American Society of Mechanical Engineers, New
Milford, Connecticut, 1980, Accessed April 2017, Available
From <http://cdn.intechweb.org/pdfs/9345.pdf>

[SAM 13] H.Samira, "Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à
aimants permanents", Thèse de magister de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,
Juin 2013.

[Ség] G. Séguier et R. Bausière, "les convertisseurs de l'électronique de puissance", la
conversion continu-alternatif Tome 4, deuxième édition, Lavoisier TEC II DOC.

[Tou] Encyclopédie de l'énergie article 80 écrit par [TOURNERY Jean-François](#) avril 2017
Site : <http://encyclopedie-energie.org/articles/les-stations-de-pompage-step>

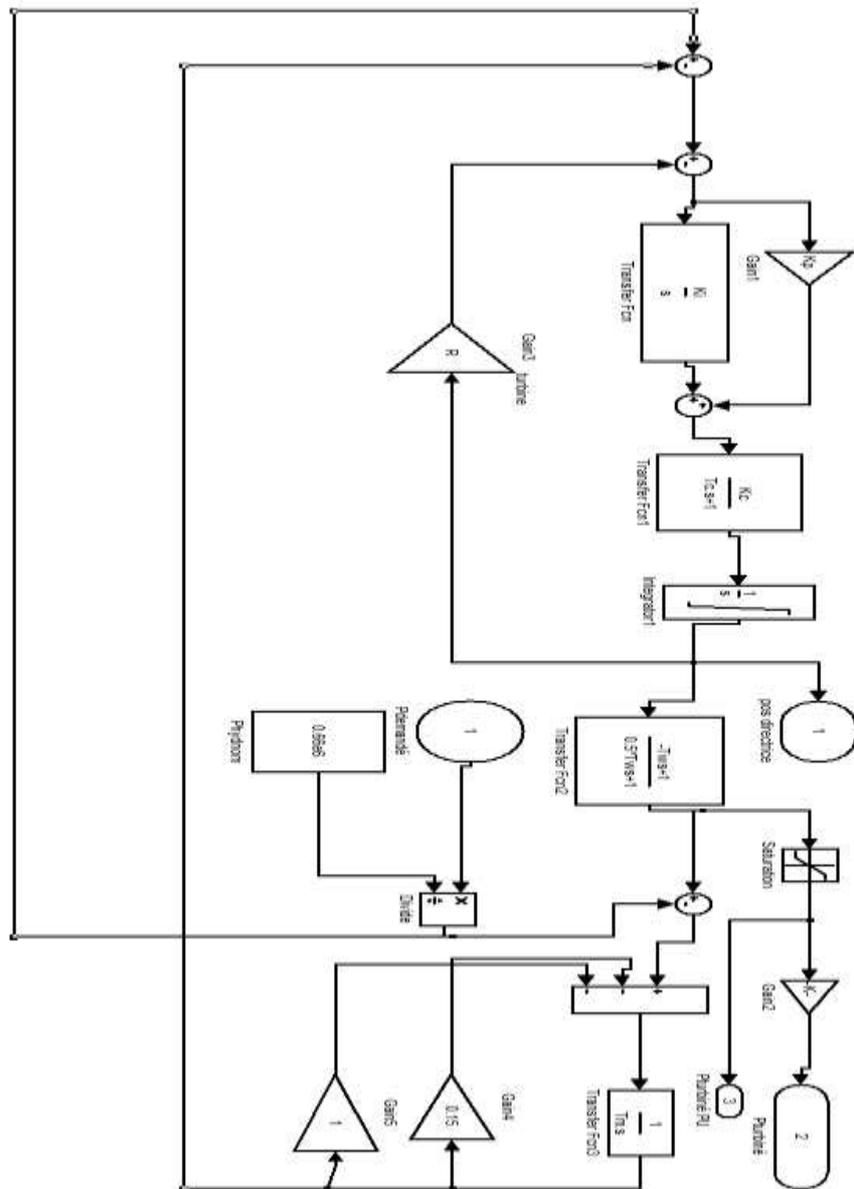
[VLH] VLH turbine project web site: www.vlh-turbine.com

[WEI 11] Hydro Turbine and Governor Modeling and Scripting for Small-Signal and
Transient Stability Analysis of Power by WEI LI Systems Master's Degree Project
Stockholm, Sweden 2011

Annexe 1

Les paramètres choisis pour la turbine ainsi que son schéma sont les suivants :

Grandeur	Valeur
T_w	1.07
R	1
K_p	2.097
K_i	0.246
K_c	1.1
T_c	0.07
T_m	0.15
Delta pu	
Delta chpu	1



Calcul des correcteurs des courants Id et Iq

$$G_{BO}(s)_d = K_{id} \left(\frac{1+T_{id}(s)}{T_{id}(s)} \right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+\left(\frac{L_d}{R_s}\right)s} \quad \text{et} \quad G_{BO}(s)_q = K_{iq} \left(\frac{1+T_{iq}(s)}{T_{iq}(s)} \right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+\left(\frac{L_q}{R_s}\right)s}$$

$$\text{Avec} \quad T_{id} = \frac{L_d}{R_s} \quad \quad \quad T_{iq} = \frac{L_q}{R_s}$$

Donc

$$G_{BF}(s)_d = \left(\frac{1}{1+\left(\frac{R_s T_{id}}{K_{id}}\right)s} \right) \quad \text{et} \quad G_{BF}(s)_q = \left(\frac{1}{1+\left(\frac{R_s T_{iq}}{K_{iq}}\right)s} \right)$$

Donc les boucles des courants correspondent à des fonctions de transfert du premier ordre.

Il suffit de fixer la dynamique du système à travers un choix approprié de T_{id} T_{iq} . Elles sont choisies de manière à ce que la constante de temps du système en boucle fermée réglé soit inférieure à la constante de temps en boucle ouverte.

$$T_{ad} = \frac{R_s T_{id}}{K_{id}} \quad \quad \quad T_{aq} = \frac{R_s T_{iq}}{K_{iq}}$$

Le temps de réponse est réglable à 5% par $K_{id/iq}$.

$$T_{rep} = 3T_a = \frac{R_s T_i}{K_i}$$

Alors

$$K_{id} = \frac{3R_s T_{id}}{(T_{rep})_d} \quad \text{et} \quad K_{iq} = \frac{3R_s T_{iq}}{(T_{rep})_q}$$