

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE

**DÉVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE HOMME-
MACHINE POUR MICROCENTRALE
HYDROÉLECTRIQUE**

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN EXIGENCE PARTIELLE À LA
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

CEDRIC LAKO

FEVRIER 2020

RÉSUMÉ

L'introduction des logiciels de simulations dynamiques des processus automatisés est devenue une réalité dans la plupart des industries dans le monde. En plus de donner en temps réel la prédiction des systèmes, ils permettent d'apprécier les actions et les mouvements attendus de ces systèmes. De plus les entreprises intègrent dans leur programme de recherche et développement certains de ces logiciels, commerciaux ou du domaine public permettant de simuler et de visualiser les procédés industriels. Ces logiciels ont été utilisés dans la conception d'une maquette de la centrale miniature développée pour fins de formation.

L'objectif principal de ce travail est d'intégrer un logiciel commercial de visualisation et de commande comme outil d'aide au contrôle, à l'instrumentation et à la supervision de la microcentrale hydroélectrique expérimentale. La thèse utilise des modèles dynamiques des éléments de la centrale hydroélectrique qui sont exécutés dans un logiciel de simulation et dont les résultats sont exportés au logiciel de visualisation par le biais d'un système de communication. Des leviers utilisateurs associés à l'interface homme machine qui représente des outils de supervision ont été développés dans le logiciel de visualisation et de commande. Des résultats de simulation sont présentés et montrent une adéquation avec le fonctionnement des centrales hydroélectriques rapportées dans la littérature scientifique.

Mots-Clés : Contrôle, Supervision, Réseau électrique, Centrale Hydroélectrique.

ABSTRACT

The introduction of dynamic simulation software for automated processes has become a reality in most industries around the world. In addition to real-time systems prediction, they allow the simulation of the expected operation of these systems. This thesis uses a commercial visualization and control software package to integrate into the design of the model of miniature hydroelectric power plant, such a software package.

The main objective of this work is to integrate this software as a tool to assist in the control, instrumentation and supervision of the experimental micro hydroelectric plant. Dynamic hydroelectric plant models are developed to simulate the plant, and its operation is captured by the visualization and control software package through a communication environment. User levers controlled by the human machine interface that represents supervisory controls have been developed. Simulations are presented that show a match between the reality of hydroelectric plants reported by the scientific literature and the results presented.

Keywords: Control, Supervision, Electric Network, Hydroelectric plant.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire fait à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), a eu lieu grâce au soutien de plusieurs personnes. Je profite de cette occasion pour leur adresser mes sincères remerciements : En premier lieu, au :

- Professeur René Wamkeue (ing., Ph.D), qui m'a proposé le présent sujet et qui fut mon directeur de recherche en début de formation dans ce programme de maîtrise, il a contribué aux bases conceptuelles et m'as permis de comprendre d'autres aspects plus poussés dans le domaine du génie électrique.
- Professeur Nahi Kandil (ing., Ph.D, UQAT), mon directeur administratif qui a donné beaucoup de son temps pour que je puisse terminer mon travail de recherche.
- Professeur Géza Joos (M.Eng., Ph.D, McGill University), mon co-directeur dans ce travail de recherche, dont les différentes orientations techniques m'ont été très bénéfiques.

Je dis aussi merci à tous les amis et connaissances rencontrés à Rouyn-Noranda notamment : Tommy Andy Theubou Tameghe, Emmanuel Ymele, Duclair Tiomo, Hermine Kengne, Juste Wamba, Eric Pem et bien d'autres encore.

J'adresse aussi un grand merci à toute ma famille de proche ou de loin.

Je tiens à souligner l'aide financière apportée au projet par Hydro-Québec et le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) dans le cadre de la subvention accordée au Professeur Wamkeue pour le projet de recherche et développement coopératif avec l'industrie intitulé *Développement d'une microcentrale expérimentale hybride modulaire et intelligente de faible puissance(hydro/éolien/diésel/solaire)*.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Abstract	ii
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des Tableaux	x
Liste des abréviations	xi
Liste des symboles.....	xii
Chapitre 1: Introduction Générale.....	1
1.1 Contexte Socioéconomique et scientifique.....	2
1.1.1 Contexte socioéconomique	2
1.1.2 Contexte scientifique	3
1.2 Définition du problème à résoudre	5
1.3 Revue de la littérature et analyse de l'existant	6
1.3.1 Étude des hydro générateurs et systèmes complexes en laboratoire	6
1.3.2 Outils de développements.....	7
1.4 Contribution et originalités	8
1.5 Objectif Général et objectifs spécifiques	10
1.6 Méthodologie.....	11
1.7 Conclusion	12
Chapitre 2: Description des Éléments et du Fonctionnement du Système.....	14
2.1 Principe de fonctionnement du simulateur analogique.....	14
2.2 La régulation de vitesse	17
2.3 La régulation de tension.....	18
2.4 La génératrice synchrone	19

2.5	Modes de fonctionnement et supervision d'une centrale hydro- électrique.....	21
2.5.1	Fonctionnement en îlot (Autonome).....	21
2.5.2	Fonctionnement en mode connecté	22
2.6	Supervision d'une centrale hydroélectrique	23
2.7	Conclusion	24
Chapitre 3: Modélisation et Simulation du système générateur hydroélectrique...		26
3.1	Généralités sur le simulateur analogique	26
3.2	Modélisation des différents sous-systèmes.....	27
3.2.1	Modélisation de la conduite forcée.....	28
3.2.2	Conversion et contrôle de la puissance hydraulique.....	31
3.2.3	La Génératrice Synchrone (GS).....	33
3.2.4	Le régulateur de vitesse	39
3.2.5	Le régulateur de tension.....	44
3.2.6	La gestion des réservoirs	50
3.3	Modélisations des charges électriques.....	54
3.3.1	Connexion à un bus infinie.....	55
3.3.2	Connexion à une charge RL série.....	56
3.3.3	Connexion à une charge RL-parallèle	57
3.3.4	La charge RC-série	57
3.4	Modélisation de l'ensemble sous Matlab/Simulink	58
3.5	Conclusion	58
Chapitre 4: Construction du module supervision Déporté dans LabVIEW		60
4.1	Présentation de l'environnement de développement intégré LabVIEW	60
4.2	Communication réseau et protocole UDP	63
4.2.1	Structure des données et piles TCP/IP	63
4.2.2	Structure de supervision du SACH.....	65

4.2.3	Implémentation réseau sous LabVIEW	66
4.3	Présentation face avant et diagramme de flux LabVIEW de l'IHM67	
4.3.1	Face arrière LabVIEW	67
4.3.2	Face avant LabVIEW	68
Chapitre 5: Essais de validation des fonctionnalités de l'interface opérateur.....		70
5.1	Introduction.....	70
5.2	Démarrage et fonctionnement normal du système	70
5.3	Enclenchement et Délestage	74
5.3.1	Tests avec la charge RL-série	74
5.3.1.1	Génératrice initialement à vide.....	74
5.3.2	Commutation de charges importantes ($R=X_L=1$ pu)	78
5.4	Scénario pour une variation brusque de la référence de niveau dans le bassin.....	81
5.5	Conclusion	82
Chapitre 6: Conclusion Générale		83
6.1	Introduction.....	83
6.2	Travaux exécutés	83
6.3	Principaux résultats.....	84
6.4	Travaux futurs proposés	84
Annexes		85
Références Bibliographiques.....		95

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Production d'énergies électrique renouvelable mondiale – situation et perspectives : (a) Production nette ; (b) Importances relatives (adapté de [7])	4
Figure 1-2 : Aperçu de la production d'électricité au Canada (adapté de [7])	5
Figure 1-3 : Simulateur analogique de centrale hydroélectrique (SACH) en construction (adapté de [25])	11
Figure 1-4 : Chronogramme de résolution des objectifs	12
Figure 2-1 : Structure d'une centrale hydraulique (adapté de [11])	15
Figure 2-2 : Centrale hydroélectrique à la base du SACH : Laforge-1, Québec	16
Figure 2-3 : Schéma synoptique du simulateur analogique de centrale hydroélectrique (SACH) [25]	16
Figure 2-4 : Organisation générale de la régulation de vitesse d'un GTA	18
Figure 2-5 : Organisation générale d'une régulation de tension [11]	19
Figure 2-6 : Illustration de la transformation de Park pour la Génératrice Synchrones	20
Figure 2-7 : Système d'automatisation de la production hydro-électrique typique basé sur le standard IEC 60870-5 (adapté de [36])	24
Figure 3-1 : Aperçue général du simulateur de centrale hydroélectrique (adapté de [25])	27
Figure 3-2 : Comparaison entre le modèle avec élasticité et chambre d'équilibre et le modèle non-linéaire simplifié obtenu avec Simulink	31
Figure 3-3 : Modèle Simulink de la Génératrice Synchrones	37
Figure 3-4 : Vérification du modèle de la GS: (a) Réponse à un échelon de commande E_{fd} de la génératrice synchrone; (b) réaction à une montée en charge sur l'axe d (inductance)	38

Figure 3-5 : Modélisation de la régulation de vitesse dans une centrale hydroélectrique.....	40
Figure 3-6 : Modèle du régulateur électromécanique de vitesse.....	43
Figure 3-7: Courbes Simulink de vérification de la boucle de régulation de vitesse	44
Figure 3-8 : Système de régulation de tension statique type (adapté de [50])	46
Figure 3-9 : Modèle proposé pour le système d'excitation	47
Figure 3-10 : Modèle Simulink de validation du régulateur statique.....	49
Figure 3-11 : Validation du régulateur de tension statique : démarrage et réaction à une perturbation de vitesse	50
Figure 3-12 : Vue d'ensemble du circuit de recirculation d'eau	51
Figure 3-13 : Modèle de régulation du niveau d'eau dans le bassin supérieur.....	53
Figure 3-14 : Validation du contrôle de la hauteur de chute sous Simulink	54
Figure 3-15 : Modélisations de la charge du simulateur: (a) le bus infini; (b) la charge RL-série; (c) la charge RL-parallèle; Charge RC-série.	56
Figure 4-1 : feuilles de façade avant (interface homme-machine) et de diagramme fonctionnel.....	62
Figure 4-2 : Objets et contrôles graphiques de bases	62
Figure 4-3 : Pile TCP/IP et structures d'échange des données en réseau	64
Figure 4-4 : Structure de supervision proposée pour le simulateur analogique	66
Figure 4-5 : Diagramme de flux LabView de l'IHM.....	68
Figure 4-6 : Organisation de la face avant de l'IHM	68
Figure 5-1 : Tension et courant (champ et terminal) au démarrage du système	71
Figure 5-2 : Tensions et Courants Statoriques de la GS au démarrage du système	71
Figure 5-3 : Couple, Vitesse synchrone et vannage au démarrage du système.....	72
Figure 5-4 : Évolution de la puissance produite ainsi que les courant dans l'axe d et q au démarrage système.....	73
Figure 5-5 : Évolution niveau d'eau dans les bassins et débits (turbine et pompe recirculation)	73

Figure 5-6 : puissance active et réactive lors de la commutation d'une charge RL-série	75
Figure 5-7 : Couple, Vitesse de rotation et vannage lors de la commutation d'une charge RL-série	76
Figure 5-8 : Tensions et Courants Statoriques lors de la commutation d'une charge RL-série	76
Figure 5-9 : tension (champ et terminal) lors de la commutation d'une charge RL-série	77
Figure 5-10 : Courant (champ et terminal) lors de la commutation d'une charge RL-série	77
Figure 5-11 : puissance active et réactive pour la commutation de charges importantes	78
Figure 5-12 : Courant (champ et terminal) pour la commutation de charges importantes	79
Figure 5-13 : tension (champ et terminal) pour la commutation de charges importantes	80
Figure 5-14 : Tensions et courants statoriques pour la commutation de charges importantes	80
Figure 5-15 : variation brusque de la référence du niveau d'eau	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5-1 : Données de simulations Charges RL (à vide à l'état initial)	74
Tableau 5-2 : Données de simulations Charges RL ($R = X_L = 1$ pu à l'état initial)	78

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AC	Alternative Current (anglais)
DC	Direct Current (anglais)
GS	Génératrice Synchrone
GTA	Groupe Turbine Alternateur
LbV	LabVIEW
MtS	Matlab/Simulink
PSS	Power System Stabilizers (anglais)
RV	Régulateur de Vitesse
SACH	Simulateur analogique de Centrale Hydroélectrique
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (anglais)
UI	User Interface (anglais)

LISTE DES SYMBOLES

k_i	-	Gain intégral du correcteur PI
k_p	-	Gain proportionnel du correcteur PI
k_a, τ_a	-, s	Gain et Constante de temps Amplificateur
k_r, τ_r	-, s	Gain et Constante de Temps Filtre de Régulation
k_g, τ_g	-, s	Gain et Constante de temps Génératrice Synchronne
k_e, τ_e	-, s	Gain et Constante de temps excitation
v_f, v_t	pu	Tension de champ et terminal du modèle d'excitatrice
α	radians	Angle amorçage thyristors excitatrice AVR
$V_{r_{\max}}, V_{r_{\min}}$	pu	Tension Maximale et Minimale de sortie du régulateur
v_{ref}	pu	Tension référence système d'excitation
U	m / s	Vitesse de l'eau
G	pu	Ouverture idéale des directrices
Q	m ³ / s	Débit de l'eau
L	m	Longueur de la conduite
A	m ²	Section de tuyau
H	m	Hauteur hydraulique nominale
H_0	m	Hauteur hydraulique nominale initiale
T_w	s	Constante de temps de l'eau
a_g	m / s ²	Accélération gravitationnelle
x_d''	pu	Réactance longitudinale subtransitoire

x_d'	pu	Réactance longitudinale transitoire
x_d	pu	Réactance longitudinale synchrone
x_q''	pu	Réactance transversale subtransitoire
x_q'	pu	Réactance transversale transitoire
x_q	pu	Réactance transversale synchrone
x_a	pu	Réactance de fuite des armatures
T_d''	s	Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit
T_d'	s	Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit
T_{d0}''	s	Constante de temps subtransitoire longitudinale en circuit ouvert
T_{d0}'	s	Constante de temps transitoire longitudinale en circuit ouvert
T_q''	s	Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit
T_{q0}''	s	Constante de temps subtransitoire transversale en circuit ouvert
r_f	Ω	Résistance du champ
T_a	s	Constante de temps des armatures
ψ_d	pu	Flux dans l'axe d
ψ_q	pu	Flux dans l'axe q
ψ_0	pu	Flux dans l'axe 0
ψ_f	pu	Flux du champ
ψ_D	pu	Flux de l'amortisseur D de l'axe d

ψ_{1Q}	pu	Flux de l'amortisseur Q1 de l'axe q
ψ_{2Q}	pu	Flux de l'amortisseur Q2 de l'axe q
x_a	pu	Réactance de fuite du stator
x_{md}	pu	Réactance de magnétisation de l'axe d
x_{mq}	pu	Réactance de magnétisation de l'axe q
x_{ff}	pu	Réactance propre du champ
x_{fD}	pu	Réactance mutuelle du champ vue dans l'axe d
x_{DD}	pu	Réactance propre d'amortisseur D
ω_b	pu	Vitesse de base en pu
ω_m	pu	Vitesse de synchronisme (du rotor) en pu
r_a	pu	Résistance d'armature
r_f	pu	Résistance du champ
r_D	pu	Résistance d'amortisseur D
r_{1Q}	pu	Résistance d'amortisseur Q1
r_{2Q}	pu	Résistance d'amortisseur Q2
v_d	pu	Tension d'armature dans l'axe d
v_q	pu	Tension d'armature dans l'axe q
v_0	pu	Tension dans l'axe 0
i_d	pu	Courant d'armature dans l'axe d
i_q	pu	Courant d'armature dans l'axe q

i_f	pu	Courant de champ
i_0	pu	Courant dans l'axe 0
i_D	pu	Courant d'amortisseur D dans l'axe d
i_{1Q}	pu	Courant d'amortisseur Q1 dans l'axe q
i_{2Q}	pu	Courant d'amortisseur Q2 dans l'axe q
Vg_{\max}	pu / s	Constante de limite maximal de vitesse d'ouverture vanne
Vg_{\min}	pu / s	Constante de limite minimal de vitesse d'ouverture vanne
g_{\max}	pu	Position d'ouverture maximale vanne
g_{\min}	pu	Position d'ouverture minimale vanne
ω_{ref}	pu	Vitesse de référence régulateur de vitesse turbine
$T_{w_{ca}}$	s	Constante de temps du démarrage d'eau conduite d'amenée
$T_{w_{ce}}$	s	Constante de temps du démarrage d'eau chambre d'équilibre
$T_{w_{cf}}$	s	Constante de temps du démarrage d'eau conduite forcée
C_{ce}	s	Constante de stockage Chambre d'équilibre
U_t	pu	Débit ou vitesse d'eau dans la turbine
U_{ca}	pu	Débit ou vitesse d'eau dans conduite d'amenée
U_{ce}	pu	Débit ou vitesse d'eau dans chambre d'équilibre
$f_{p_{cf}}$	pu	Coefficient de pertes de charges dans la conduite forcée
$f_{p_{ca}}$	pu	Coefficient de pertes de charges dans la conduite d'amenée
$f_{p_{ce}}$	pu	Coefficient de pertes de charges dans la chambre d'équilibre

D_w	pu / pu	Amortissement turbine
\bar{U}_{NL}	pu	Vitesse ou débit de l'eau à vide dans les conduits
T_{pmp}	pu	Constante de temps du débit d'eau du contrôle de niveau
G_{pmp}	pu	Gain du contrôle de niveau
Kp_{pmp}	-	Gain proportionnel du correcteur PI pour contrôle de niveau
Ki_{pmp}	-	Gain intégral du correcteur PI pour contrôle de niveau
T_1	s	Constante de temps déclencheur thyristor
z_p	pu	Gain de compensation impédance de ligne
R_d	pu	Gain chute inductive

Chapitre 1: INTRODUCTION GÉNÉRALE

Une centrale hydro-électrique convertit l'énergie potentielle de l'eau en énergie électrique. Les principaux éléments de ce dispositif sont la turbine et l'alternateur. La microcentrale dont il sera question dans le présent document aura des aménagements presque identiques à ceux d'une centrale hydroélectrique à la seule différence que la production d'énergie et les composantes de la centrale sont à petite échelle. La simulation dynamique d'une microcentrale est abordée dans ce rapport et nous travaillerons sur une plateforme de type expérimental. Cette dernière est conçue spécialement pour un usage didactique avec pour but premier la familiarisation des étudiants et le personnel technique aux paramètres caractérisant le fonctionnement des grandes centrales hydroélectriques en vue de l'intégration des énergies renouvelables [1].

Nous présenterons dans ce chapitre le contexte de la présente recherche, suivie de la problématique et des objectifs. Nous passerons en revue la plateforme existante ainsi que quelques solutions proposées. Enfin, nous terminerons ce chapitre par la méthodologie.

1.1 Contexte Socioéconomique et scientifique

Les récentes décisions concernant les changements climatiques et les nouvelles politiques énergétiques à travers la planète ont conduit à des développements majeurs dans l'industrie de la production d'énergie électrique. Ces dernières laissent entrevoir les changements sur l'exploitation de l'énergie électrique, et l'adoption par les producteurs, des nouvelles stratégies visant à adapter les services pour garantir à la fois des profits et la qualité. Dans la présente section, nous abordons quelques aspects saillants du contexte socio-économique dans lequel s'inscrit la présente recherche.

1.1.1 Contexte socioéconomique

Les enjeux socioéconomiques actuels de la production d'énergie électrique sont axés sur la réduction des gaz à effets de serre (GAES) et autres impacts écologiques associés. L'encadrement des émissions de carbone est une solution politico-économique populaire matérialisée par l'adoption des politiques contraignantes telles que l'instauration de nouvelles taxes. Di Xiang et al. [1], ont étudié le cas spécifique de l'impact de la taxe carbone instaurée en 2008 sur la consommation résidentielle en gaz naturel en Colombie britannique (Canada). L'un des constats majeurs est une baisse d'environ 10.1% de la consommation durant les années qui ont suivi cette mesure. Ceci est en droite ligne avec les effets escomptés. Cependant, cette solution pose un éventail de problèmes socioéconomiques (l'exemple de la justesse fiscale) [2].

D'autres initiatives plus globales à l'instar de la conférence de Paris sur les changements climatiques (cop21, Paris-2015) ont récemment consisté à fixer des objectifs de réduction des GAES. Ceux-ci ont été ratifiés par la quasi-totalité des gouvernements à travers le monde et Bilbar en dresse un bilan et explore les principales perspectives dans [3]. Il est à noter que les défis sont différents suivants les pays et leurs ressources naturelles et certaines résolutions paraissent irréalistes.

Cependant, le stockage massif de l'énergie électrique est une solution technique à explorer qui pourrait faire basculer bon nombre de facteurs d'analyse. Malgré les problèmes socioéconomiques et politiques posés par de telles initiatives globales, il n'en demeure pas moins que les problèmes énergétiques et climatiques que connaît notre planète exigent une approche concertée.

1.1.2 Contexte scientifique

Une source d'énergie est dite renouvelable si elle est réapprovisionnée par des processus naturels à un taux au moins égal à celui de son utilisation [4]. On peut ainsi citer la biomasse, l'énergie solaire, la chaleur géothermique, l'énergie éolienne et le mouvement de l'eau (rivières et océans). La définition précédente exclut le nucléaire en général souvent cité comme une source d'énergie "propre" [5]. Une centrale hydroélectrique transforme en électricité l'énergie cinétique d'une chute ou d'un cours d'eau, et sans doute la technologie de production d'énergie électrique la mieux maîtrisée. S'insérant dans le cycle naturel de l'eau (rivières-fleuves-océans-nuages-pluies), son exploitation se fait sans consommer, ni gaspiller ou même épuiser les ressources en eau de la planète. Ainsi, la filière hydroélectrique constitue une part importante de production électrique mondiale, notamment du Canada qui est l'un des rares pays exportateur net et autosuffisant en électricité [6]. Le graphique de la Figure 1-1 résume le bilan de la production renouvelable mondiale de 2010 à 2015 ainsi que des perspectives jusqu'à 2040 d'après l'agence américaine de l'énergie (US-EIA, [7]). On peut observer une production hydroélectrique sans cesse croissante à l'instar de toutes les autres énergies renouvelables avec cependant une part de moins en moins importante. En effet, les grands projets hydroélectriques englobent un ensemble de projets dérivés allant de l'aménagement de barrages-réservoirs à l'infrastructure de transport (HVAC ou HVDC) de l'énergie produite. Ainsi, les projets de construction de ces grandes infrastructures sont "budgétivores", ont une empreinte écologique importante (géographie et hydrologie modifiées), et

se réalisent sur le long terme, ce qui n'est pas en adéquation avec l'urgence socioéconomique récemment exposée.

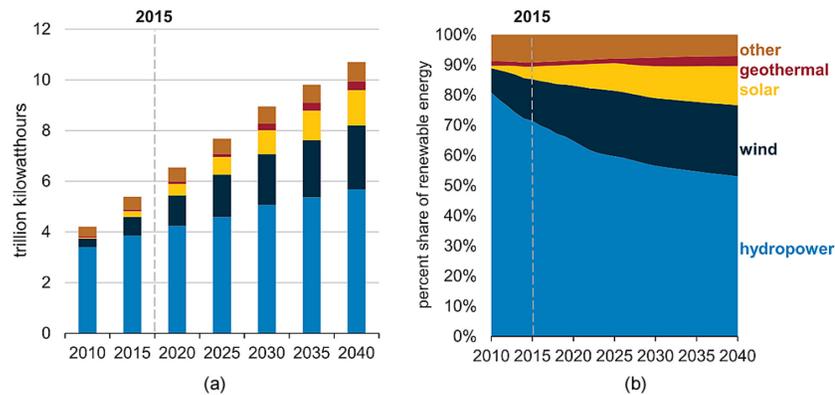


Figure 1-1 : Production d'énergies électrique renouvelable mondiale – situation et perspectives : (a) Production nette ; (b) Importances relatives (adapté de [7])

La réfection des grandes centrales existantes ainsi que le déploiement de la micro-hydroélectricité et des micro-réseaux électriques sont parmi les solutions les plus encouragées pour répondre à l'urgence climatique et socio-économique. Ainsi, les grands producteurs d'énergie électrique procèdent activement à la modernisation de leurs réseaux électriques déjà très complexes. Ces derniers nécessitent les services d'un personnel formé dans la vision des nouveaux paradigmes, notamment le réseau intelligent (smartgrid) et micro-réseau (microgrid). Au Canada, le Québec et l'hydroélectricité sont intimement liés comme le montre le graphique de la Figure 1-2 résumant la production d'électricité au Canada par province durant l'année 2012.

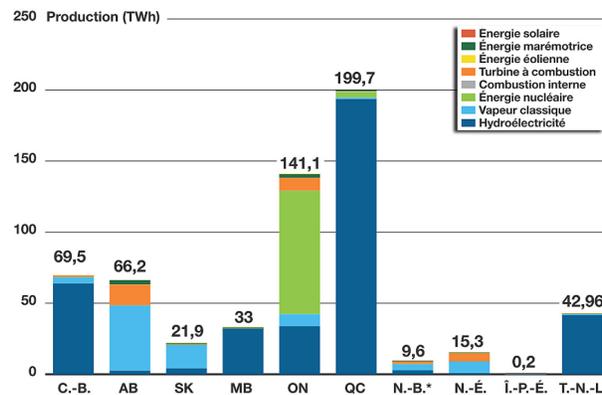


Figure 1-2 : Aperçu de la production d'électricité au Canada (adapté de [7])

Compte tenu de la part importante qu'occupe l'hydroélectricité au Québec, la formation du personnel technique à l'intégration des autres sources d'énergie renouvelables est une piste activement explorée. À cet effet, un simulateur analogique a été conçu au centre de formation de Rouyn-Noranda (Région d'Abitibi-Témiscamingue au Québec). Ce dernier est destiné à servir de base à ce qui va être un véritable outil de test et de démonstration des modes de fonctionnement d'un micro-réseau ou d'un réseau intelligent, à partir de composantes réelles au facteur d'échelle près (Puissances et dimensions réduites). Ce dernier point constitue le nœud de la problématique et des objectifs du présent travail.

1.2 Définition du problème à résoudre

Des efforts de transition énergétique et d'adaptation aux nouvelles réalités de la production d'énergie électrique, des outils de prototypages proches de la réalité fonctionnelle des systèmes doivent être intégrés dans la formation de l'ingénieur. Une pléthore d'environnements de programmation et de développements de modèles numériques à l'instar des suites logicielles Matlab/Simulink (MtS), LabVIEW (LbV), Eclipse-PyDev, Visual Studio, Power World et bien d'autres [8-10]. Parmi ces outils, les logiciels Matlab/Simulink et LabVIEW sont des environnements de développements graphiques modernes permettant le déploiement de simulations de

haut niveau (MtS) et d'interfaces de contrôle ergonomiques (LbV). C'est donc naturellement que ces derniers ont été choisis pour mener à bien le travail de construction de l'interface opérateur du simulateur analogique de centrale hydroélectrique (SACH). Cette dernière, destinée à être utilisée comme plate-forme de simulation du comportement d'une grande centrale hydroélectrique, est actuellement en cours de construction.

1.3 Revue de la littérature et analyse de l'existant

Dans la présente section nous proposons un bref aperçu des ouvrages et publications scientifiques clefs utilisées dans la présente recherche. Une littérature abondante a été produite sur les sujets de la production d'énergie électrique en général et des centrales hydroélectriques en particulier. Bien sûr, notre travail se base sur des classiques de la production d'énergie électrique telles que traitées dans [11] et [12], abondamment référencées, ainsi que les standards tels que [13] donnant les tests et procédures applicables à la machine synchrone et [14] regroupant les modèles d'excitatrices et stabilisateurs pour l'étude dynamique des générateurs électriques.

1.3.1 Étude des hydro générateurs et systèmes complexes en laboratoire

Les références [15-19] proposent des simulateurs de systèmes complets visant l'étude en laboratoire des systèmes complexes et hétérogènes tels que les générateurs hydroélectriques. La référence [18] présente un banc de test de 9 kVA pour l'étude dynamique d'un réseau intelligent. Leur système de supervision s'appuie sur un réseau de communication Ethernet et plusieurs émulateurs déportés se synchronisant à une base de données centrale. Une approche similaire est proposée par Panos et al. dans [19] où le concept de "d'équipement de puissance dans la boucle" (*Power Hardware-In-the-Loop, PHIL*) est utilisé. Il permet de faire coexister dans la même boucle de simulation à la fois du matériel (physique) de puissance et des modèles (logiciels) s'exécutant en temps réel sur des ordinateurs

dédiés. Ainsi, des équipements non disponibles ou tout simplement coûteux et délicats peuvent être approximés par des modèles numériques et exploités sans risque de dégradation en environnement d'apprentissage. La référence [17] présente un modèle numérique de centrale hydroélectrique entièrement implémenté sous Matlab/Simulink. Les modèles présentés permettent de mieux cerner les interactions entre les différents sous-systèmes, ainsi que des prédictions lors d'évènements transitoires. La référence [15] fait une modélisation approfondie d'une centrale hydroélectrique multi-groupe et présente une architecture d'automatisation basée sur plusieurs SCADA et interfaces opérateur employant un bus Ethernet pour l'échange des données.

1.3.2 Outils de développements

Les environnements de développements sont des éléments clés dans l'implantation des modèles mathématiques et la vérification d'algorithmes de contrôle. La référence [10] présente un ensemble de logiciels utilisés dans le domaine de la recherche en systèmes d'énergie électrique. Le logiciel Matlab/Simulink (MtS) développé par Mathworks® est l'environnement plébiscité dans le domaine du génie électrique. Basé sur l'algèbre matricielle, il permet l'exécution rapide de calculs numériques et dispose d'outils puissants de représentation des données. Les modèles peuvent être implémentés textuellement en employant des scripts Matlab ou via l'interface graphique Simulink permettant de faire abstraction des lignes de codes et l'utilisation des centaines de bibliothèques faisant partie du logiciel. MtS est enrichie par des boîtes à outils (*toolboxes*) qui sont des ajouts logiciels permettant de démarrer des projet complexes à partir de "*briques logicielles préfabriqués*".

Les évolutions récentes dans les domaines des interfaces et l'automatisation par ordinateur a permis le développement de nombreux outils de simulation et de contrôle. Lunca et al. dans [20] soulignent l'impact des outils de nouvelle génération dans le domaine de la formation. LabVIEW (LbV), l'acronyme de *Laboratory*

Virtual Instrumentation Engineering Workbench, est un logiciel produit par National InstrumentsTM depuis 1986. Au fil des ans, ce dernier est devenu un véritable leader dans le domaine de l'instrumentation industrielle et s'impose de plus en plus dans le monde de la recherche scientifique. Dans un environnement LbV, le développement est accéléré par la méthode de programmation graphique consistant à "*glisser et déposer*" des instruments virtuels (interrupteurs, afficheurs, voltmètres, oscilloscopes, etc.) sur une feuille de programmation et à les raccorder par des lignes d'échanges de données numériques. Le programme est rendu cohérent et séquentiel par des structures de contrôles standards (*if-else, for, while, do, switch-case, etc.*) elles-mêmes représentées graphiquement. Ainsi, une interface graphique (IHM) est construite pour contrôler les instruments virtuels (VI) qui sont à la base des modèles d'équipements s'exécutant en arrière-plan. Des exemples concrets d'exploitation de LbV pour la recherche sont donnés dans [21-23]. Vue les similitudes observées entre MtS et LbV, T. Tadej et al. proposent une comparaison entre ces deux outils dans [24]. Les critères de comparaison utilisés sont le calcul matriciel, la transformée rapide de Fourier (*FFT*), l'analyse de fonctions des transferts à l'aide du digramme de Bode, et le contrôle du moteur à courant continu. Il en ressort que MtS est plus indiqué pour le calcul numérique cependant, LbV possède des performances non-négligeables et à la particularité d'accélérer la production d'interfaces graphiques.

1.4 Contribution et originalités

La microcentrale sous étude a été conçue à travers un ensemble de travaux réalisés par des étudiants de l'UQAT. Les plus pertinents pour la présente étude sont donnés dans les références bibliographiques [17, 25, 26]. Le présent travail se démarque de ces derniers dans les aspects suivants :

- Nous étudions le comportement en temps réel de la centrale et traitons particulièrement de l'infrastructure à mettre en œuvre pour surveiller à

distance ses variables de fonctionnement. À cet effet, nous proposons une interface graphique fonctionnelle et entièrement construite sous l'environnement LabVIEW, qui est un puissant outil de programmation graphique, déjà très répandu dans le monde industriel et qui est de plus en plus adoptés par les scientifiques du domaine électrique [22-24, 27, 28].

- La structure de traitement de l'information proposée a été construite de manière à tirer avantage de la flexibilité des nouveaux standards réseaux que sont l'Ethernet ou le wifi (liaisons physiques) et le protocole TCP/IP (échanges logiques). L'échange d'informations en temps réel a été testé en effectuant une boucle logicielle entre l'environnement Matlab/Simulink et l'interpréteur LabVIEW exécutant l'IHM.
- Pour disposer d'une plateforme de test des commandes et des affichages avec l'IHM produite, une modélisation modulaire et complète du SACH a été effectuée sous Simulink, avec en plus une structure de mise en réseau de toutes les données entrantes ou sortantes. Ceci permet de contrôler le modèle de la microcentrale en attendant l'aboutissement de sa construction. Le raccordement de l'IHM au SACH construit se fera donc via le réseau local (ou le VPN), en accordant les adresses IP de l'automate central à l'ordinateur hébergeant l'IHM LabVIEW (voir chapitre 5).
- Dans les précédents travaux, le système de recirculation d'eau n'est pas abordé. Nous proposons une analyse de l'automatisation de ce système et montrons comment réguler le niveau d'eau du bassin supérieur. Cette grandeur est à la base du fonctionnement de la conduite forcée et de la production de puissance. Une telle régulation permet entre autres de simuler la grande capacité du bassin de retenue d'une centrale réelle, dont le niveau est supposé constant dans la quasi-totalité des ouvrages de références consultés.

L'interface proposée est directement exploitable, et les résultats obtenus pour divers scénarios de fonctionnement sont présentés. Par ailleurs, aux meilleurs de nos connaissances actuelles, la littérature ne présente pas d'exemple concret de jumelage de la puissance de calcul de Matlab/Simulink au prototypage d'interface graphique sous LabVIEW. Notre démarche méthodologique consistant à élaborer une interface homme-machine IHM fonctionnant en temps réel avec un modèle numérique du système à bâtir laisse entrevoir une alternative crédible à l'outil "guide", hautement complexe, traditionnellement utilisé pour bâtir des interfaces sous Matlab.

Enfin, le logiciel dynamique LabVIEW, implémenté pour ce travail dans la simulation et la supervision de la microcentrale hydroélectrique expérimentale, constitue à la fois un bon outil pédagogique qui facilitera la formation technique de l'ingénieur et du technicien opérateur de centrale et qui aidera ultimement à la modernisation de la microcentrale expérimentale via la recherche.

1.5 Objectif Général et objectifs spécifiques

Ce travail vise le développement d'une interface de supervision de la microcentrale. Cet objectif prend appui sur la structure simplifiée donnée à la Figure 1-3 [25]. Pour atteindre cet objectif nous l'avons subdivisé en objectifs spécifiques :

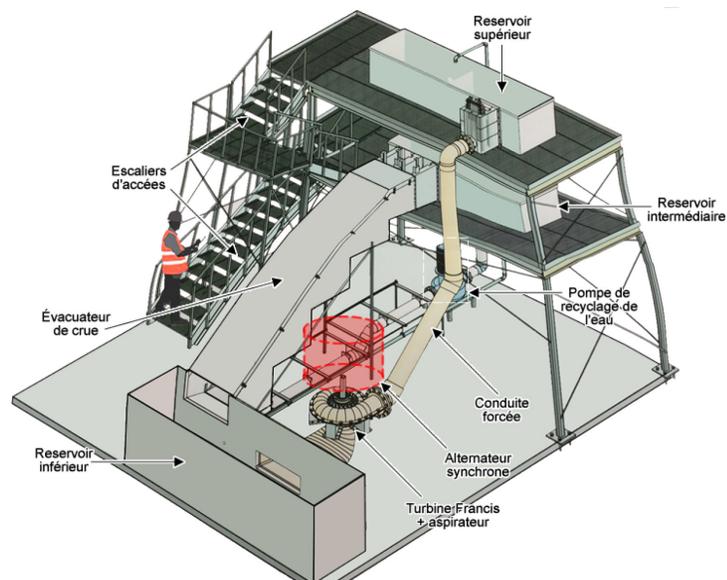


Figure 1-3 : Simulateur analogique de centrale hydroélectrique (SACH) en construction (adapté de [25])

- i). Revisiter les modèles employés dans la littérature pour représenter les composantes dynamiques répertoriées ;
- ii). Identifier les différents points de mesures et les variables pertinentes pour la supervision et le contrôle de la microcentrale et choisir un protocole de liaison avec l'interface opérateur (*user interface* ou UI) ;
- iii). Construire l'interface opérateur (UI) en utilisant les instruments virtuels LabVIEW (LbV) et le modèle de communication réseau du système ;
- iv). Simuler divers scénarios de fonctionnement (normal, enclenchement, délestage, etc.) ;
- v). Faire une validation croisée des résultats obtenus.

1.6 Méthodologie

La démarche méthodologique est liée aux objectifs précédemment cités. La finalité étant la supervision de la centrale réelle (Figure 1-3), nous utiliserons des modèles numériques et nous implémenterons à l'aide de Matlab/Simulink (MtS). Ceci sera réalisé dans l'idée de remplacer les modèles par le système réel une fois ce dernier

construit. Les délais de construction étant indépendants du présent travail les validations de l'UI se fera dans un premier temps sur les modèles construits, et une simulation à distance sera utilisée. Notre démarche est résumée dans le diagramme de la Figure 1-4.

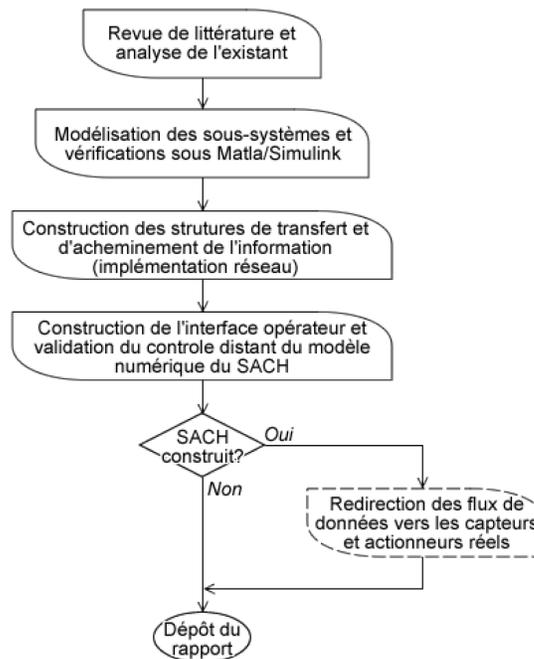


Figure 1-4 : Chronogramme de résolution des objectifs

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le contexte socio-économique, et scientifique. Ce dernier est marqué par le développement accru des nouveaux moyens de production de l'énergie électrique et leur adaptation aux réseaux actuels, largement bâtis sur les technologies de production hydroélectriques. Pour s'adapter à cette transition, un projet de construction d'un simulateur analogique de centrale hydroélectrique à l'échelle d'un laboratoire a été entrepris. Ce dernier a été présenté et mis en rapport avec la problématique et les objectifs de notre recherche. Les objectifs se résument à la modélisation du simulateur et la construction d'une

interface opérateur exploitable dans un environnement de formation. La démarche méthodologique est axée à la fois sur la modélisation et l'implémentation de la centrale en Matlab/Simulink, et le contrôle des modèles via une interface opérateur construit sous LabVIEW. Ces entités sont implémentées dans des environnements séparés et permettront à terme d'obtenir un véritable banc d'essai avec l'interface opérateur contrôlant les équipements réels. La revue de la littérature exposée montre que la modélisation et l'implémentation numérique des divers sous-systèmes est abondamment traitée, mais il y a un certain manque en ce qui concerne des exemples concrets de commande à l'aide de LabVIEW devenu au fil des années un véritable outil industriel et une alternative à Matlab. Par ailleurs, ces deux outils seront mis en œuvre de manière complémentaire: Matlab pour le calcul numérique et LabVIEW pour le contrôle en temps réel. La suite de ce mémoire s'organise comme suit: le chapitre 2 décrit les éléments et le fonctionnement du système; le chapitre 3 regroupe les travaux de modélisation ainsi que les principaux résultats obtenus sous Matlab; le chapitre 4 traite de l'automatisation et de la construction de l'interface opérateur; et dans le chapitre 5 nous présentons une synthèse complète du système avec la simulation de plusieurs scénarios et dans le chapitre 6 nous abordons la conclusion découlant des résultats obtenus.

Chapitre 2: DESCRIPTION DES ÉLÉMENTS ET DU FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME

Dans le présent chapitre, nous présentons les éléments constituant le simulateur analogique de centrale hydroélectrique sous étude. Leurs interactions et différents modes de fonctionnement sont aussi exposés. .

2.1 Principe de fonctionnement du simulateur analogique

La production hydroélectrique consiste essentiellement à capter et convertir l'énergie de mouvement d'un cours d'eau en énergie mécanique dans un premier temps, puis en énergie électrique. La conversion hydromécanique est basée sur l'accélération de la masse d'eau sous l'effet de la gravité. Ce processus s'opère dans un système de tuyauterie appelé conduites forcées. La masse d'eau accélérée est précipitée sur les aubes d'une turbine qui se met en mouvement. La puissance de rotation (produit vitesse \times couple mécanique) de cette dernière est contrôlée via des aubes directrices disposées à la sortie de la conduite forcée. La turbine est couplée à une génératrice synchrone (GS) qui effectue la conversion électromécanique. Un ensemble d'éléments connexes de régulation est construit autour de cette structure centrale (groupe turbine-alternateur).

La structure d'une centrale hydroélectrique standard est illustrée à la Figure 2-1. Kumar et Singal [29] ont présenté une revue détaillée du fonctionnement de ces systèmes. Jawahar et Prawin [30] ont présenté le cas spécifique des micro-turbines, qui reprennent à échelle réduite la structure des grandes centrales (sans la retenue d'eau).

Plusieurs modèles de la turbine hydraulique sont présentés dans [11, 31, 32]. Du point de vue de la commande, notamment le développement du régulateur de vitesse, les modèles employés mettent en relation la hauteur de chute, le débit d'eau,

le degré d'ouverture des vannes directrices réglant l'admission d'eau autour de la turbine et la puissance mécanique produite. En général l'hypothèse de la non-compressibilité de l'eau est utilisée pour simplifier les calculs. Cette hypothèse est particulièrement vérifiée dans le cas de la microcentrale compte tenu des dimensions réduites. L'utilisation des systèmes adimensionnels est aussi appliquée pour simplifier l'analyse et la représentation des données qui sont de différentes natures (vitesse, débit, hauteur, pression, puissances, couple, force, etc.). Ceci permet aussi d'élaborer des modèles linéarisés autour des points de fonctionnement donnés. La microcentrale (SACH) est particulièrement étudiée dans [25]. Le SACH a été initialement conçu sur la base de similitudes avec la centrale hydroélectrique Laforge-1 dont un aperçu est donné à la Figure 2-2. Le schéma synoptique du simulateur est donné à la Figure 2-3 et un aperçu de sa structure physique en construction a été représenté au Chapitre 1 (voir Figure 1-3).

On distingue principalement :

- (i) le sous-système hydraulique qui fonctionnera en circuit fermé;
- (ii) le sous-système de régulation de vitesse fixant la fréquence ou la puissance du générateur suivant le mode de fonctionnement [33] utilisé;
- (iii) le sous-système de régulation de tension fixant la tension ou la puissance réactive échangée suivant le mode de raccordement.

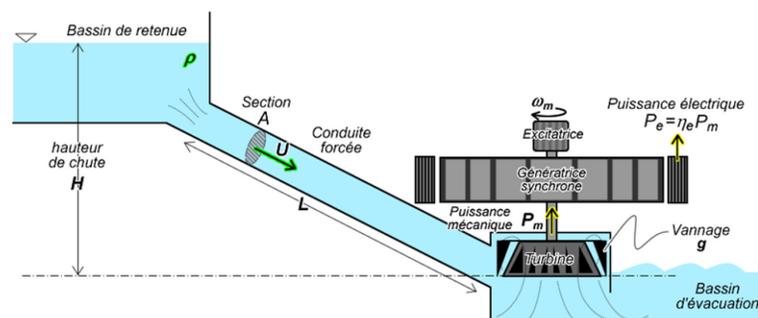


Figure 2-1 : Structure d'une centrale hydraulique (adapté de [11])



Figure 2-2 : Centrale hydroélectrique à la base du SACH : Laforge-1¹, Québec

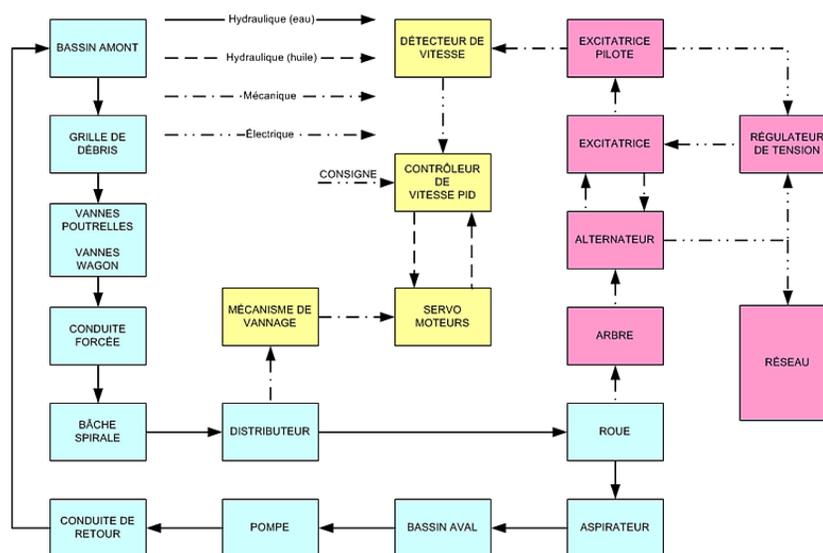


Figure 2-3 : Schéma synoptique du simulateur analogique de centrale hydroélectrique (SACH) [25]

Le sous-système de recirculation d'eau (i) est une particularité du SACH spécialement ajouté pour représenter aussi fidèlement que possible le cours d'une rivière réelle. Un évacuateur de cru (non-représenté sur le synoptique) est aussi prévu à cet effet. Cette structure fait aussi penser aux systèmes de stockage hydroélectriques pompés abordés dans [34]. Quant à eux, les sous-systèmes de régulation de tension et de vitesse sont abondamment traités [11, 15, 31, 32, 35-37].

2.2 La régulation de vitesse

Une revue détaillée axée sur la régulation de vitesse dans le cas spécifique des turbines hydroélectriques est proposée par Vladimir Koritarov et al. dans [38]. Comme son nom l'indique, le régulateur de vitesse (RV) sert en premier à fixer la vitesse de rotation ω_m du groupe turbine alternateur (GTA). Puisque l'alternateur est de type synchrone, une vitesse fixe permet de définir la pulsation ω_e des tensions produites par la relation (2.1) où n_p est le nombre de paires de pôles de l'alternateur et f_e la fréquence électrique (60 Hz en Amérique du nord). Ainsi, le RV reçoit en entrée une consigne de vitesse (resp. de fréquence) et la compare à la mesure de la vitesse de rotation de la turbine (resp. de la fréquence des tensions). L'écart observé est traité par un correcteur de type PID (proportionnel-dérivée-intégral) qui produit le signal de contrôle permettant de régler l'admission d'eau par les vannes directrices. On a ainsi un système asservi qui doit être adéquatement réglé pour fonctionner de manière stable. Le réglage des régulateurs de vitesse est spécialement abordé dans [36, 37] et d'autres références s'y trouvant.

$$\omega_e = 2\pi f_e = n_p \omega_m \quad \Rightarrow \quad f_e = \frac{n_p}{2\pi} \omega_m \quad [\text{Hz}] \quad (2.1)$$

Une génératrice hydroélectrique étant construite pour faire partie d'un réseau électrique, c'est-à-dire couplé à d'autres alternateurs synchrones souvent distants, chaque régulateur de vitesse possède un paramètre spécial de statisme (ou *droop* [33]). Ce dernier permet d'attribuer à chaque générateur engagé dans le réseau une caractéristique fréquence-puissance (active) qui permet une répartition automatique des charges entre les générateurs interconnectés. Le régulateur de vitesse permet ainsi une régulation de puissance [39] en mode connecté. La régulation de vitesse est en général organisée tel que montré par la Figure 2-4.

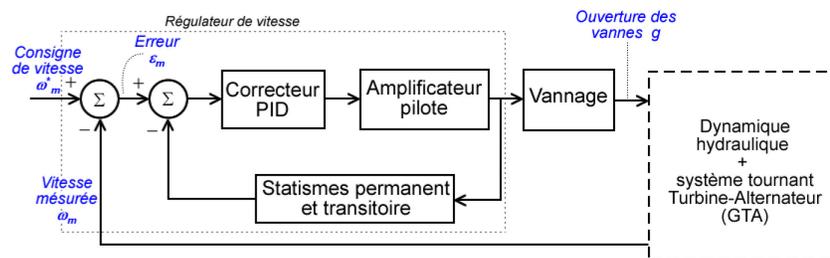


Figure 2-4 : Organisation générale de la régulation de vitesse d'un GTA

2.3 La régulation de tension

La régulation de tension est intimement liée aux transferts de puissance réactive entre le GTA et le circuit électrique externe. Ce système est bâti autour de l'excitatrice qui est une sorte d'amplificateur électrique géant, chargé d'alimenter le rotor de la GS. Le standard IEEE 421-5 [14] donne un ensemble de recommandations et de modèles à utiliser pour inclure les systèmes d'excitation dans les simulateurs numériques. Bon nombre de ces recommandations sont reprises à travers la littérature traitant de la régulation de tension et les modèles sont réadaptés en fonction du contexte (avec ou sans stabilisateur par exemple). On distingue trois principales technologies d'excitation d'une génératrice :

- (i) l'excitation DC (courant continu) utilisant un petit générateur à courant continu fixé en bout d'arbre du GTA;
- (ii) l'excitation AC (courant alternatif) utilisant un petit alternateur monophasé ou triphasé en bout d'arbre du GTA;
- (iii) et l'excitation statique tirant sa puissance DC directement de la tension statorique produite par la génératrice, via des redresseurs à thyristors.

La Figure 2-5 (adaptée de [11]) donne l'organisation générale d'un régulateur de tension. Toutes les mesures sont acheminées vers un élément central qui dans un premier temps calcule l'erreur entre la consigne et la mesure de la tension terminale. L'erreur observée est altérée par d'autres signaux de compensation v_{aux} .

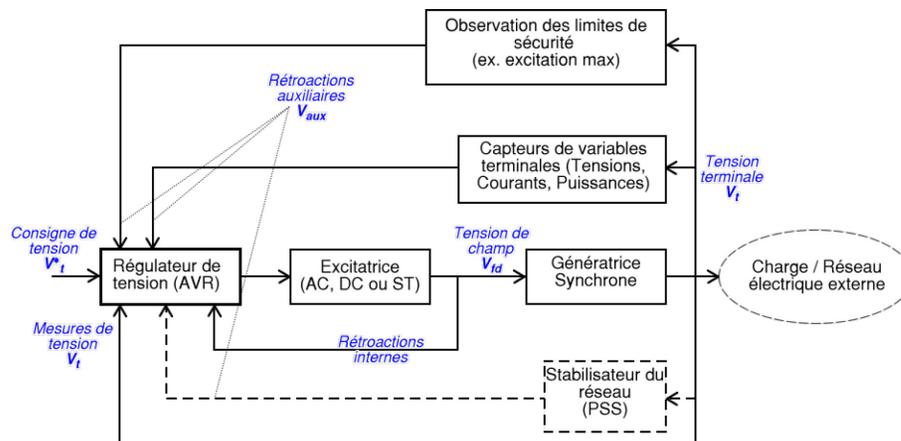


Figure 2-5 : Organisation générale d'une régulation de tension [11]

Des boucles internes peuvent être réalisées entre l'excitatrice et le régulateur pour améliorer la stabilité. Des supra-boucles (PSS) peuvent aussi être ajoutées pour compenser les oscillations inter-régions [40] lorsque le réseau électrique externe est étendu. Ainsi dans les bouclages PSS, les variations lentes de fréquences sont utilisées pour ajuster les tensions terminales des génératrices, pour stabiliser les échanges de puissances via les relations faibles liant la tension et la puissance. La modélisation et le réglage des systèmes régulateurs sont spécialement détaillés dans [11, 12], le standard [14] et bon nombre de publications y faisant référence telle que [40].

2.4 La génératrice synchronique

Comme toute machine tournante, la Génératrice Synchronique (GS) est essentiellement constituée d'un rotor et d'un stator. Le rotor porte des enroulements de forte capacités (ampérage) qui traversés par un courant continu i_{fd} produisent un champ magnétique avec des pôles nord et sud régulièrement distribués à sa périphérie. Ces zones magnétiques peuvent être de construction lisses (encastrées) ou saillantes (en relief). Le rotor est solidaire de la turbine qui l'entraîne dans son mouvement de

rotation provoquant ainsi des tensions induites dans les bobinages statoriques. Ces derniers sont en général de types triphasés dans le cas des centrales hydroélectriques. La GS est largement documentée dans la littérature scientifique. Sa modélisation est particulièrement abordée dans les ouvrages de référence tel que [11, 12, 41]. Le Standard IEEE 115 [13] répertorie l'ensemble de ses paramètres et les tests applicables pour leurs déterminations. Le fonctionnement de la GS est régi par des équations de flux et de tension résumées à l'**Annexe 1**. Ces équations résultent des transformations de Park consistant à projeter toutes les variables triphasées (tension, courants et flux de phases a, b et c) dans le référentiel tournant du champ créé au stator par le rotor en rotation. La transformation de Park couramment employée est donnée par l'équation matricielle à l'**Annexe 1** (A.15). $\theta_e = \omega_e t + \theta_o$ représente l'angle que fait le champ rotorique (axe d) avec la phase a du stator. θ_o est la position initiale du rotor, arbitrairement pris nul dans la majorité des cas. La Figure 2-6 illustre la transformation de Park. L'analyse de la GS est aussi simplifiée en définissant un système cohérent de grandeurs de bases (valeurs nominales de tensions, courants, puissances, etc.) par rapport aux quelles on écrit toutes les équations en divisant chaque variable par la base correspondante. Les valeurs adimensionnelles ainsi obtenues s'expriment en pu.

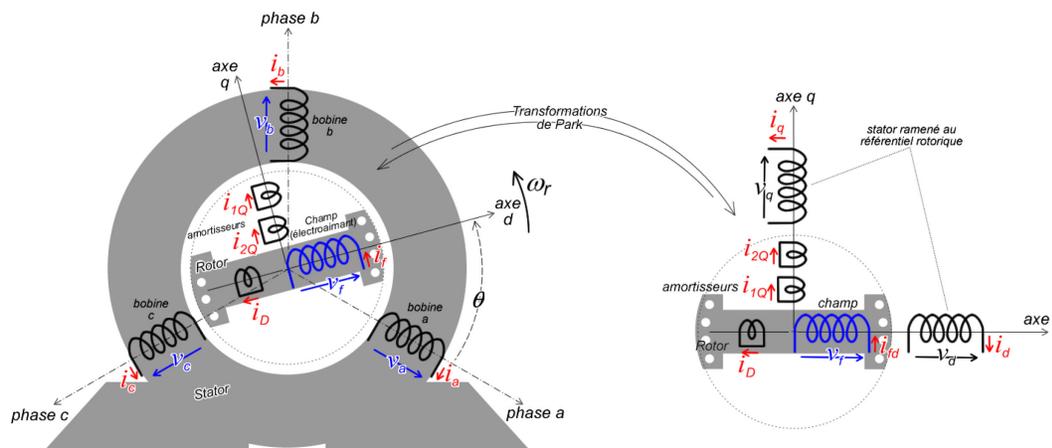


Figure 2-6 : Illustration de la transformation de Park pour la Génératrice Synchrones

L'intégration numérique des équations de base telles qu'effectuées par A. Barakat et al. dans [42] et bien d'autres, permet d'obtenir les courants lorsque les tensions terminales sont déterminées (cas du bus infini). De nombreux autres auteurs tels qu'Anderson [12] et Sauer [41] définissent un ensemble de variables dérivées utilisées pour identifier les constantes de temps ($T'_{do}, T''_{do}, T'_{qo}, T''_{qo}$) et les réactances transitoires (x'_d, x''_d, x'_q, x''_q) de la GS. Ces dernières permettent d'écrire les fonctions de transfert utiles à l'analyse des boucles de régulation de tension [43].

2.5 Modes de fonctionnement et supervision d'une centrale hydro-électrique

Dans la pratique, les centrales hydroélectriques sont construites pour générer de la puissance dans un vaste réseau électrique comprenant d'autres générateurs. Cependant ces derniers sont capables de fonctionner de manière autonome, c'est-à-dire isolée de toute autre source stabilisatrice. Dans chaque cas, les signaux et les structures des régulateurs présentés à la section précédente sont réaménagés pour assurer la cohérence du système de production. La présente section expose les deux principaux modes de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique ainsi que le principe de supervision dudit système.

2.5.1 Fonctionnement en îlot (Autonome)

Le mode de fonctionnement en îlot se réfère aux centrales qui fonctionnent sans connexion au réseau de distribution d'électricité [44]. Dans ce mode de fonctionnement, les tensions et les fréquences délivrées varient en fonction de la charge. La plupart des centrales utilisent des régulateurs hydromécaniques, mais dans le cas d'un système en îlot, une meilleure approche consiste à utiliser un régulateur avec contrôleur PID (voir Figure 2-4). Ce dernier assure un fonctionnement isochrone en fixant la fréquence au point d'exploitation de l'énergie [32]. Ceci correspond à un statisme proche de zéro (réactivité maximale) lorsqu'un

correcteur hydromécanique est employé. Pour réguler la vitesse, le correcteur produit une commande de puissance (ouverture des vannes) à la turbine, ce qui permet d'accélérer ou de freiner le groupe turbine-alternateur (GTA) de manière à annuler l'erreur. La partie intégrale du correcteur cesse alors d'intégrer et produit une sortie constante (intégrale de zéro). La partie dérivée sert en général à éviter les dynamiques brusques lors de la modification de la référence de vitesse. Cette grandeur étant fixe, l'action dérivée est maintenue nulle en mode isochrone.

Le régulateur de tension fonctionne sur le même principe de correction PID et produit la puissance réactive nécessaire pour réguler la tension au point d'alimentation de la charge à 1 pu.

2.5.2 Fonctionnement en mode connecté

En mode connecté, le GTA fonctionne en tandem avec d'autres GTA parfois distant. Vu la capacité quasi-infinie de cette configuration, le point de raccordement au réseau est appelé bus infini, imposant sa tension (1 pu) et sa fréquence (1 pu) au GTA considéré. Dans ce cas, le réglage du statisme permet de lier l'écart de vitesse (référence-bus infini) à la puissance active injectée. La vitesse mesurée (voir Figure 2-4) étant fixée par le réseau infini, l'écart est réglé par la vitesse de référence. Le paramètre dérivé du correcteur est alors ajouté pour éviter des transitoires excessifs lorsque la référence est modifiée. En outre, le régulateur de vitesse se transforme en contrôleur de puissance active injectée. Il en est de même pour le régulateur de tension qui est utilisé pour l'injection de puissance réactive.

Cependant, cette injection est limitée par les capacités de l'excitation et la puissance nominale des génératrices exprimées en Méga-Volts-Ampères (S_{base}). Lorsque la capacité d'un GTA est dépassée, des unités supplémentaires doivent être connectée (ou produire plus) pour l'alléger. Le régulateur de vitesse est aussi mis à contribution pour l'atténuation des oscillations inter-régions observée dans les réseaux étendus

[14, 40]. Les entrées de commandes auxiliaires pour le PSS (voir Figure 2-5) sont utilisées à cet effet.

Les commandes d'injection de puissance proviennent d'un système de régulation régional contrôlant plusieurs unités de production. Ce superviseur règle les injections de puissance en fonction de la demande et des capacités de chaque unité de production pour éviter un effondrement total de la production ("blackout") pouvant être provoqué par le décrochage successif des unités de production.

2.6 Supervision d'une centrale hydroélectrique

La supervision consiste à commander un processus et à en observer le fonctionnement. Pour atteindre ces objectifs, le système de supervision doit entre autres collecter en temps réel et enregistrer des données importantes (variable d'états ou entrée et sorties), afin de détecter une éventuelle perte de fonction pour déclencher des alertes traitées par l'opérateur humain. Ceci se fait via une Interface Opérateur (IO) ou une Interface Homme-Machine (IHM) dont le but ultime est de donner à l'opérateur, des leviers de commandes du système de production d'énergie. Traditionnellement, un système de supervision de type SCADA ("*Supervisory Control And Data Acquisition*") est employé dans le domaine de l'énergie. Il comprend un ensemble de tâches et de fonctions visant à observer et contrôler le fonctionnement du système de production [45].

Les SCADA ont pour base un réseau d'unités terminales distantes (RTU) qui collectent les données issues des capteurs (courants, tensions, fréquences, puissances, vitesses, etc.), situées à proximité des unités de production. Les relevés et les rapports d'état des équipements peuvent également être effectués par des Automates Programmables Industriels (API) dans le cas des systèmes peu étendus comme dans le cas du SACH sous étude.

La Figure 2-7 présente un système d'automatisation de la production hydro-électrique typique [45] et permet d'identifier les principales fonctions implémentées dans un tel système. Les échanges des données sont basés sur une topologie en anneau régie par le standard IEC 60870-5 [46] qui est une norme traitant de la surveillance et des télécommunications associées aux systèmes de production d'énergie électrique. Cette structure intègre la prise en compte du TCP/IP qui est utilisée par l'Internet. L'interface graphique proposé pour le SACH sera entre autres basé sur cette technologie (voir Chapitre 4).

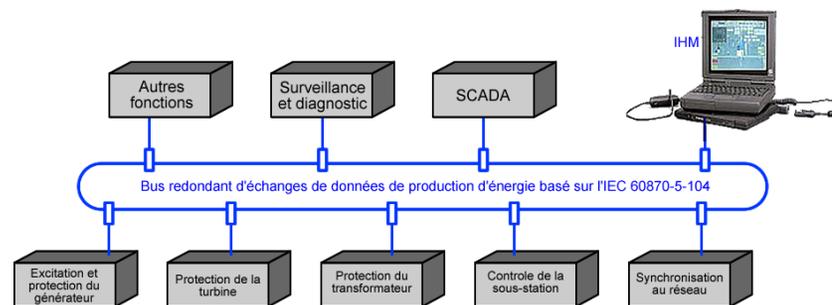


Figure 2-7 : Système d'automatisation de la production hydro-électrique typique basé sur le standard IEC 60870-5 (adapté de [36])

2.7 Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons présenté le simulateur analogique de la centrale hydroélectrique sous étude. Le concept a été bâti sur le modèle d'une centrale hydroélectrique réelle. Il est construit autour d'un groupe turbine-alternateur miniature qui permettra de tester les scénarios de production d'une centrale réelle. Basé sur ce synoptique, il a été constaté que le système possède deux boucles de régulation essentielles. La première consiste à réguler la vitesse d'entraînement de la génératrice synchrone produisant l'énergie électrique et l'autre permet de réguler la tension produite. Un tel système peut être utilisé pour simuler en laboratoire les modes autonomes et connectés d'un groupe turbine-alternateur. La microcentrale étudiée est en cours de construction et nécessite un système de supervision et de

commande donnant un ensemble de leviers de contrôle de ses fonctions. Les chapitres suivants sont axés sur les modélisations de la microcentrale qui nous permettra de disposer d'une plateforme de test de l'interface homme-machine (IHM) proposée.

Chapitre 3: MODÉLISATION ET SIMULATION DU SYSTÈME GÉNÉRATEUR HYDROÉLECTRIQUE

Dans le chapitre précédent, la description des éléments et le fonctionnement du système ont été présentés. Dans le présent chapitre, nous traitons de la modélisation et de la simulation d'un système hydroélectrique complet. Les ouvrages de références à l'instar de [11, 12] exposent les bases de ce sujet. Ainsi, les modèles utilisés sont tirés d'une riche littérature dont une revue est proposée au chapitre 1. Nous les adaptons au système concret du SACH, dont une modélisation pertinente a été proposée dans [17]. Dans la suite, nous présentons globalement le système à la section 3.1. La section 3.2 traite de la modélisation de chaque sous système. Les principaux modèles des charges électriques sont donnés et analysés à la section 3.3. À la section 3.4 le modèle global du système est présenté.

3.1 Généralités sur le simulateur analogique

La Figure 3-1 représente un aperçu global du SACH. Conçu pour des fins de formation du personnel technicien ou ingénieur, un accent a été mis sur la miniaturisation des principaux éléments d'une centrale réelle, tout en sauvegardant les aspects fonctionnels. Ainsi, un grand réservoir d'eau monté tout en haut de la structure permet de simuler le bassin de retenue réel. Une vanne guillotine sert à contrôler la prise d'eau vers la conduite forcée. Cette dernière est constituée d'une tuyauterie de grande section menant à la bêche spirale située au niveau 0 (rez-de-chaussée) de la structure. Le groupe turbine alternateur de 3 kVA suivant le concept initial. Des détails des travaux de conception de la génératrice sont développés dans [26]. La bêche spirale porte le cercle de vannage actionné par des vérins (électromécaniques ou hydrauliques) permettant de régler la conversion de puissance au niveau de la turbine qui est de type Francis. Un aspirateur monté en sortie de la bêche spirale permet de faire la liaison avec le réservoir inférieur

modélisant le canal de fuite. Un circuit hydraulique de retour actionné par une pompe permet de recycler l'eau vers le réservoir intermédiaire et le réservoir supérieur. Le réservoir intermédiaire situé au niveau 1 est exploité pour simuler les opérations d'évacuation de crue en cas de débordement du réservoir supérieur. Le simulateur est construit dans une structure portante assez grande pour que jusqu'à 8 travailleurs (formateurs, apprenants, chercheurs) puissent s'y déplacer aisément et avoir un accès direct à l'équipement.

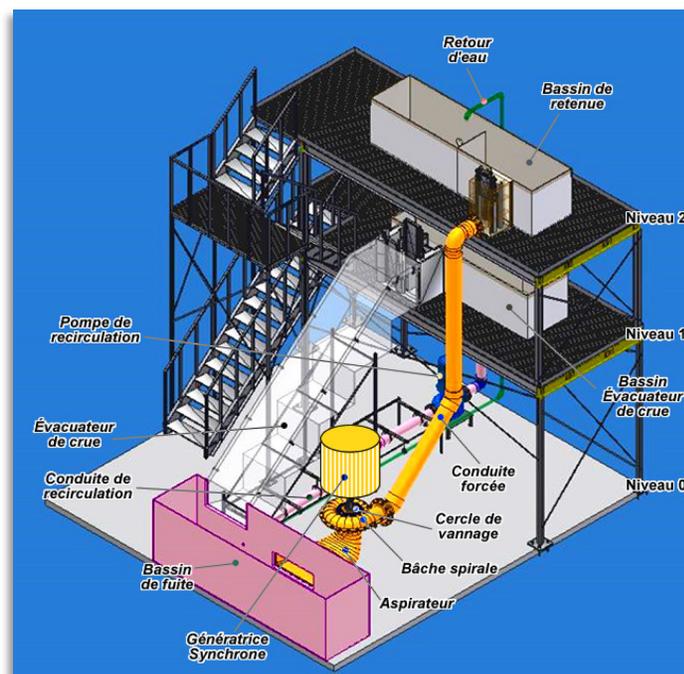


Figure 3-1 : Aperçue général du simulateur de centrale hydroélectrique (adapté de [25])

3.2 Modélisation des différents sous-systèmes

Le schéma synoptique du simulateur est présenté à la Figure 2-3 (voir page-16). Dans le présent travail, nous le subdiviserons en 7 principaux sous-systèmes qui seront tour à tour analysés :

- 1- La conduite forcée ;
- 2- La turbine hydro-électrique (Francis) ;
- 3- Le régulateur de vitesse ;
- 4- L'alternateur synchrone ;
- 5- Le système d'excitation et de régulation de tension ;
- 6- La charge du système (charge isolée ou réseau infini) ;
- 7- Les réservoirs et la recirculation d'eau.

3.2.1 Modélisation de la conduite forcée

La conduite forcée relie le bassin supérieur à la bêche spirale. Cette tuyauterie sert à canaliser le flux d'eau afin d'obtenir la vitesse maximale au niveau de la turbine. Les références [35] et [11] présentent plusieurs modèles exploitables pour la simulation dynamique des centrales hydro-électriques. Ainsi, il existe une multitude de modèles de conduites forcées suivant les approximations employées pour accélérer les calculs (compressibilité de l'eau, turbulences et pertes, présence ou non d'une chambre d'équilibre, etc.).

En utilisant les hypothèses d'incompressibilité de l'eau, de rigidité des parois de la conduite forcée et non turbulence de l'écoulement [11], la dynamique de l'eau dans la conduite forcée peut être décrite par trois principales grandeurs: la vitesse de l'écoulement U , son accélération dU/dt et la puissance mécanique convertie par la turbine P_m . Les calculs hydrodynamiques de base sont donnés par (3.1)-(3.4).

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (3.1)$$

$$P_m = K_p H U \quad (3.2)$$

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{a_g}{L} (H - H_0) \quad (3.3)$$

$$Q = AU \quad \text{avec} \quad A = \pi(\varnothing_{\text{conduite}}/2)^2 \quad (3.4)$$

L'équation (3.1) donne la vitesse d'écoulement de l'eau en fonction du degré d'ouverture G des vannes et de la hauteur de chute H (niveau du bassin supérieur par rapport à la turbine). K_u est la constante de proportionnalité définie par le système de vannage. La puissance mécanique P_m extraite est proportionnelle à la vitesse de l'eau et à la hauteur de chute telle qu'exprimée par (3.2) où K_p est une constante de proportionnalité. L'équation (3.3) donne l'accélération de la colonne d'eau contenue dans la conduite forcée de longueur $L = \sum L_i$ et soumise à l'accélération de la gravité a_g . $(H - H_o)$ représente la variation de la pression hydraulique au niveau de la turbine. Suivant le principe de continuité, le débit d'eau (3.4) se conserve tout au long de la conduite forcée de section constante A .

En pratique, on emploie des grandeurs adimensionnelles exprimées en pu ("per-units") obtenues en divisant chaque variable par une valeur nominale tel que donné par (3.5), où l'indice "r" dénote les grandeurs nominales et la barre supérieure la grandeur adimensionnelle. Ceci permet entre autres d'éliminer les constantes de proportionnalité dans (3.1) et (3.2) tel que montré par (3.6). L'expression de l'accélération de la colonne d'eau en pu est donnée par (3.7) où T_w est le temps de démarrage sous charge nominale. L'expression (3.9), où s représente la variable Laplace, résume le modèle (non-linéaire) de la vitesse d'eau dans la conduite forcée. On peut aussi introduire les pertes de charges en considérant que la pression hydraulique $\bar{H}_t = \bar{H}$ au niveau de la turbine est constituée d'une valeur brute \bar{H}_{t0} diminuée des pertes dans la conduite tel que donné par (3.10). Les analyses empiriques montrent que les chutes de pression sont corrélées au carré du débit d'eau dans la conduite forcée et f_p est le coefficient de perte.

$$\bar{U} = \frac{U}{U_r}; \bar{G} = \frac{G}{G_r}; \bar{H} = \frac{H}{H_r}; \bar{P} = \frac{P}{P_r} \quad (3.5)$$

$$\Rightarrow \bar{U} = \bar{G}\sqrt{\bar{H}}; \bar{P} = \bar{U}\bar{H} \quad \text{et} \quad \bar{Q} = \bar{U} \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow \frac{d\bar{U}}{dt} = -\frac{1}{T_w}(\bar{H} - \bar{H}_0) \quad (3.7)$$

$$\text{avec } T_w = \frac{LU_r}{a_g H_r} = \frac{LQ_r}{a_g H_r A} \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow \bar{U} = \frac{1}{sT_w}(\bar{H}_0 - \bar{H}) = F(s)(\bar{H}_0 - \bar{H}) \quad \text{avec} \quad \bar{H} = \left(\frac{\bar{U}}{\bar{G}}\right)^2 \quad (3.9)$$

$$\bar{H}_l = \bar{H}_{l0} - \bar{H}_l \quad \text{avec} \quad \bar{H}_l \approx f_p \bar{U}^2 \quad (3.10)$$

Les précédentes équations sont particulièrement valides dans le cas d'une conduite forcée de dimensions réduites comme le SACH. Pour simuler de plus grandes conduites, il faut tenir compte de la compressibilité de l'eau et de son effet sur la relation entre la pression hydraulique et la vitesse de l'eau (voir (3.9)). On peut alors retrancher à \bar{H}_l le terme \bar{H}_g donné par (3.11) où Z_c représente l'impédance dans la conduite, lorsque l'on considère que la pression dans le fluide se propage comme une onde progressive d'un bout à l'autre. T_{el} est une constante de temps liée à l'élasticité de l'eau. Les détails sur ce modèle sont développés par Mello et al. dans [35].

$$\bar{H}_{l1} = \bar{H}_l - \bar{H}_g \quad \text{avec} \quad \bar{H}_g = Z_c \tanh(sT_{el})\bar{U} = Z_c \frac{1 - e^{-2sT_{el}}}{1 + e^{-2sT_{el}}}\bar{U} \quad (3.11)$$

La Figure 3-2 présente une comparaison entre le modèle avec élasticité et chambre d'équilibre construit à partir de [35] et le modèle non-linéaire précédemment développé. La puissance hydraulique comparée montre que le modèle non-linéaire simplifié sous-estime la réponse instantanée et surestime la puissance en régime permanent. Ceci est notamment dû à la non-prise en compte des effets d'élasticité induisant des pertes, ainsi que les délais de propagation induisant des transitoires qui s'estompent plus ou moins rapidement. Le modèle simplifié sera donc utilisé

pour évaluer les boucles de régulation et les validations se feront avec le modèle plus complet repris de [35].

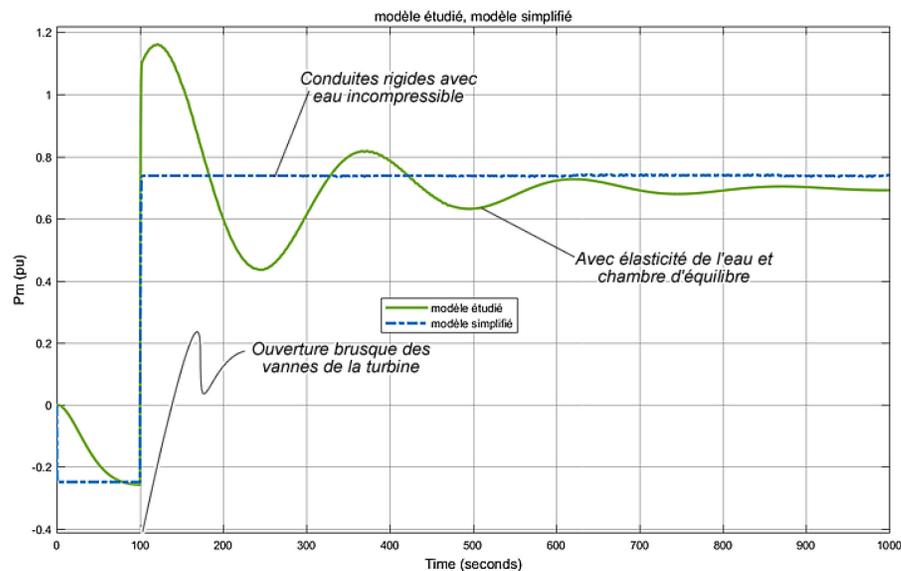


Figure 3-2 : Comparaison entre le modèle avec élasticité et chambre d'équilibre et le modèle non-linéaire simplifié obtenu avec Simulink

3.2.2 Conversion et contrôle de la puissance hydraulique

La puissance mécanique s'obtient à partir de la vitesse de l'eau par (3.12), où \bar{U}_{NL} représente la vitesse minimale (ou le débit minimum) nécessaire de l'eau dans la bêche spirale faisant tourner la turbine. Suivant les équations de bases, \bar{U}_{NL} est donnée par (3.13) où A_t représente le gain du système de vannage et \bar{g} est l'action de commande en pu. Le couple mécanique de la turbine \bar{T}_m s'obtient en divisant la puissance mécanique par la vitesse de rotation de la turbine $\bar{\omega}_m$ telle que donnée par (3.14). La grandeur \bar{P}_r permet d'adapter les unités adimensionnelles de la turbine à celles de la génératrice.

$$\bar{P}_m = (\bar{U} - \bar{U}_{NL}) \bar{H}_t \quad (3.12)$$

$$\bar{U}_{NL} = A_t \bar{G}_{NL} \sqrt{\bar{H}_0} \quad (3.13)$$

$$\Rightarrow \bar{T}_m = \frac{\bar{P}_r}{\bar{\omega}_m} (\bar{U} - \bar{U}_{NL}) \bar{H}_t = \frac{\bar{U} - \bar{U}_{NL}}{\bar{\omega}_m} \left(\frac{\bar{U}}{A_t \bar{g}} \right)^2 \bar{P}_r \quad \text{avec} \quad \bar{P}_r = \frac{P_r}{S_{base}} \quad (3.14)$$

Lorsque des analyses en petites-variations sont à effectuer (cas des régulateurs linéaires), on utilise généralement le modèle linéaire de la turbine par (3.15) où $\Delta \bar{P}_m$ représente les petites variations de puissances correspondant au vannage $\Delta \bar{G}$. La turbine Francis est donc un système à phase non minimale (son inverse n'est pas stable), ce qui la rend délicate à contrôler. Plus concrètement on peut observer que, la turbine répond à une ouverture instantanée des vannes par une baisse de puissance, ce qui est contraire à l'effet recherché.

$$\Delta \bar{P}_m = \frac{1 - sT_w}{1 + sT_w/2} \Delta \bar{G} \quad (3.15)$$

La dynamique de rotation de la turbine dépend de l'inertie totale de l'ensemble en rotation (masse de la turbine et rotor de la GS), des frictions liées aux roulements et paliers de fixation, et au couple de réaction de la génératrice. L'équation dynamique est donnée par (3.16) où D représente le coefficient de frictions mécaniques. L'équivalent en pu est trouvée en divisant (3.16) par le couple de base de la génératrice et on a (3.17) où H (en secondes) représente l'énergie de rotation à la vitesse nominale rapportée à la puissance de base en VA. L'équivalent de Laplace est donné par (3.18).

$$J_T \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_g - D\omega_m \quad (3.16)$$

$$\Rightarrow 2H \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_g - f_\omega \bar{\omega}_m \quad \text{avec} \quad H = \frac{J_T \omega_r^2 / 2}{S_{base}} \quad \text{et} \quad f_\omega = \frac{D\omega_r^2}{S_{base}} \quad (3.17)$$

$$\Rightarrow \bar{\omega}_m = \frac{K_m}{1 + sT_m} (\bar{T}_m - \bar{T}_g) \quad \text{avec} \quad K_m = 1/f_\omega \quad \text{et} \quad T_m = 2H/f_\omega \quad (3.18)$$

Il est courant en pratique de négliger les pertes du GTA ($f_\omega \approx 0$) et l'ensemble mécanique se comporte comme un intégrateur du différentiel de couple entre l'hydraulique (\bar{T}_m) et l'électrique (\bar{T}_g). Ainsi, la vitesse de rotation $\bar{\omega}_m$ doit être maintenue constante en agissant sur le vannage de manière à garder l'équilibre des couples au niveau d GTA. Le module régulateur de vitesse est modélisé à la section 3.2.4.

3.2.3 La Génératrice Synchrone (GS)

La GS du SACH en cours de construction est particulièrement étudiée dans [26] et les références [11-13, 17, 41, 47] en présentent des modélisations détaillées. Les équations servant de bases à ces modèles sont données par l'Annexe 1. Ces équations sont écrites dans le référentiel Park qui permet d'éliminer les interactions mutuelles variables entre les bobinages rotoriques et statoriques. Les tensions statoriques en pu sont données par (3.19)-(3.20) où ω_b [rad/s] est la pulsation statorique de base et n_p le nombre de paires de pôles. v_t est l'amplitude de la tension terminale obtenue aux bornes de la GS. Notons que lorsque les tensions produites sont équilibrées, la tension homopolaire v_o est nulle et aucune dynamique ne s'y produit. La liste des symboles définit les différentes grandeurs apparaissant dans les équations de la GS, tandis que l'Annexe 2 regroupe le calcul des principales grandeurs de bases utilisées pour obtenir ses équations adimensionnelles. Par soucis de simplification des écritures, les barres indiquant les grandeurs en pu ne sont pas représentées.

$$\begin{cases} v_d = -r_a i_d - \omega_m \psi_q + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_d}{dt} \\ v_q = -r_a i_q + \omega_m \psi_d + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_q}{dt} \end{cases} \quad \text{avec } \omega_b = n_p \times \omega_r \quad (3.19)$$

$$\text{et } v_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (3.20)$$

Lorsqu'une charge triphasée (équilibrée) est connectée aux bornes de la GS, celle-ci produit des courants triphasés $i_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ qui rapportés au référentiel dq s'écrivent $i_{dq} = [i_d \ i_q]^T$. La puissance terminale produite par la GS est alors donnée par (3.22) où le terme P_g représente la puissance électromagnétique convertie. On en déduit l'expression (3.23) donnant le couple de réaction de la partie électrique sur la partie mécanique utilisé dans (3.18).

$$\begin{aligned} P_t &= v_d i_d + v_q i_q = \left(-r_a i_d - \omega_m \psi_q + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_d}{dt} \right) i_d + \left(-r_a i_q + \omega_m \psi_d + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_q}{dt} \right) i_q \\ &= \left(\omega_m \psi_d i_q - \omega_m \psi_q i_d \right) - r_a (i_d^2 + i_q^2) + \frac{1}{\omega_b} \left(i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} &= \omega_m (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - r_a i_t^2 + \frac{1}{\omega_b} \left(i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt} \right) \\ \Rightarrow P_t &= P_g - P_{js} + \frac{dE_{\psi s}}{dt} \quad \text{avec} \quad P_g = \omega_m (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\Rightarrow T_g = \frac{P_g}{\omega_m} = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (3.23)$$

Les équations dynamiques données par l'**Annexe 1** sont exploitables sous formes matricielles telle que dans [17, 43]. Cette écriture est idéale pour mener des analyses d'identification des paramètres et l'implémentation numériques à l'aide de scripts Matlab, mais ne font pas apparaître explicitement les grandeurs dynamiques standards exploitées en production. Il s'agit notamment des réactances et constantes de temps transitoires et subtransitoires. Une analyse approfondie des relations entre les paramètres statiques (cf. circuits dq équivalents) et les paramètres transitoires est effectuée par P. Kundur dans [11]. Les principales relations pour les réactances sont résumées par (3.24). Le remplacement dans les équations de flux permet d'écrire (3.25)-(3.31). Notons que les nouvelles variables e'_q et e'_d ont des dimensions de flux.

$$x'_d \approx x_d - \frac{x_{md}^2}{x_{ff}}; x'_q \approx x_q - \frac{x_{mq}^2}{x_{1Q0}}; x''_d \approx x_a + \frac{1}{1/x_{md} + 1/x_f + 1/x_D}; x''_q \approx x_a + \frac{1}{1/x_{mq} + 1/x_{1Q} + 1/x_{2Q}} \quad (3.24)$$

$$\Rightarrow i_f = \frac{1}{x_{md}} \left(e'_q + (x_d - x'_d)(i_d - i_D) \right) \quad (3.25)$$

$$\Rightarrow i_{1Q} = \frac{1}{x_{mq}} \left(e'_d + (x_q - x'_q)(i_q - i_{2Q}) \right) \quad (3.26)$$

$$\Rightarrow i_D = \frac{x'_d - x''_d}{(x'_d - x_a)^2} \left(\psi_D + (x'_d - x_a)i_d - e'_q \right) \quad (3.27)$$

$$\Rightarrow i_{2Q} = \frac{x'_q - x''_q}{(x'_q - x_a)^2} \left(\psi_{2Q} + (x'_q - x_a)i_q - e'_d \right) \quad (3.28)$$

$$\Rightarrow \psi_d = -x''_d i_d + \frac{x'_d - x_a}{x'_d - x_a} e'_q + \frac{x'_d - x''_d}{x'_d - x_a} \psi_D \quad (3.29)$$

$$\Rightarrow \psi_q = -x''_q i_q - \frac{x''_q - x_a}{x'_q - x_a} e'_d + \frac{x'_q - x''_q}{x'_q - x_a} \psi_{2Q} \quad (3.30)$$

$$\text{avec } e'_q = \frac{x_{md}}{x_f} \psi_f; e'_d = -\frac{x_{mq}}{x_{1Q}} \psi_{1Q} \quad (3.31)$$

Les expressions précédentes sont insérées dans les équations de dynamiques des tensions et on obtient (3.32)-(3.37). Ces dernières sont une simple reformulation des équations de bases dans un espace où les paramètres dynamiques x'_d , x''_d , T'_{do} et T''_{do} sont explicitement représentées et les ingénieurs en formation peuvent utiliser les données standards.

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} \left[-e'_q - (x_d - x'_d) \left[i_d - \frac{x'_d - x''_d}{(x'_d - x_a)^2} \left(\psi_D + (x'_d - x_a)i_d - e'_q \right) \right] + E_{fd} \right] \quad (3.32)$$

$$\frac{de'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{qo}} \left[-e'_d + (x_q - x'_q) \left[i_q - \frac{x'_q - x''_q}{(x'_q - x_a)^2} \left(\psi_{2Q} + (x'_q - x_a)i_q + e'_d \right) \right] \right] \quad (3.33)$$

$$\frac{d\psi_D}{dt} = \frac{1}{T''_{do}} \left[-\psi_D + e'_q - (x'_d - x_a)i_d \right] \quad (3.34)$$

$$\frac{d\psi_{2Q}}{dt} = \frac{1}{T''_{qo}} \left[-\psi_{2Q} - e'_d - (x'_q - x_a)i_q \right] \quad (3.35)$$

$$\text{Avec } E_{fd} = \frac{x_{md}}{r_f} v_f; \quad T'_{do} = \frac{x_f}{\omega_b r_f}; \quad T'_{qo} = \frac{x_{1Q}}{\omega_b r_{1Q}}; \quad (3.36)$$

$$\text{et } T''_{do} = \frac{1}{\omega_b r_D} \left(x_D + \frac{1}{1/x_{md} + 1/x_f} \right); \quad T''_{qo} = \frac{1}{\omega_b r_{2Q}} \left(x_{2Q} + \frac{1}{1/x_{mq} + 1/x_{1Q}} \right) \quad (3.37)$$

Le modèle implémenté pour la génératrice est donné par (3.38)-(3.43) et les expressions des différentes constantes par (3.44).

$$\frac{de'_d}{dt} = -\frac{1+k_{1q}}{T'_{qo}} e'_d - \frac{1}{T'_{qo}} (k_{2q} i_q + k_{1q} \psi_{2Q}) \quad (3.38)$$

$$\frac{de'_q}{dt} = -\frac{1+k_{1d}}{T'_{do}} e'_q + \frac{1}{T'_{do}} (k_{1d} \psi_D - k_{2d} i_d + E_{fd}) \quad (3.39)$$

$$\frac{d\psi_D}{dt} = -\frac{1}{T''_{do}} \psi_D + \frac{1}{T''_{do}} (e'_q - k_{5d} i_d) \quad (3.40)$$

$$\frac{d\psi_{2Q}}{dt} = -\frac{1}{T''_{qo}} \psi_{2Q} - \frac{1}{T''_{qo}} (e'_d + k_{5q} i_q) \quad (3.41)$$

$$\psi_d = -x''_d i_d + k_{3d} e'_q + k_{4d} \psi_D; \quad \psi_q = -x''_q i_q - k_{3q} e'_d + k_{4q} \psi_{1Q} \quad (3.42)$$

$$\begin{cases} v_d = -r_d i_d - \omega_m \psi_q + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_d}{dt} \\ v_q = -r_q i_q + \omega_m \psi_d + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_q}{dt} \end{cases} \quad \text{et } v_i = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} k_{1d} &= \frac{(x'_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_a)^2} & k_{2d} &= \frac{(x''_d - x_a)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_a)} & k_{3d} &= \frac{(x''_d - x_a)}{(x'_d - x_a)} & k_{4d} &= \frac{(x'_d - x''_d)}{(x'_d - x_a)} \\ k_{1q} &= \frac{(x'_q - x''_q)(x_q - x'_q)}{(x'_q - x_a)^2} & k_{2q} &= \frac{(x''_q - x_a)(x_q - x'_q)}{(x'_q - x_a)} & k_{3q} &= \frac{(x''_q - x_a)}{(x'_q - x_a)} & k_{4q} &= \frac{(x'_q - x''_q)}{(x'_q - x_a)} \\ k_{5d} &= (x'_d - x_a) & k_{5q} &= (x'_q - x_a) \end{aligned} \quad (3.44)$$

Le modèle Simulink construit à partir des équations précédentes est représenté à la Figure 3-3. On peut observer que la variable E_{fd} directement dérivée de la tension de champ (voir équation (3.36)) et les tensions triphasées peuvent être obtenues en effectuant une transformée de Park inverse. Ce modèle est mieux adapté à

l'évaluation du comportement réel de la GS, notamment lorsque l'on implémente un régulateur de tension suivant les recommandations de l'IEEE-421.5 [14]. Les entrées de courants i_d et i_q permettent d'intégrer les réactions de la charge et de simuler avec précision le comportement dynamique lors d'un délestage ou d'une reconnexion. L'entrée de vitesse $W_r_pu = \omega_m$ permet de prendre en compte l'effet de la mécanique sur la production de tension et rends le modèle non-linéaire.

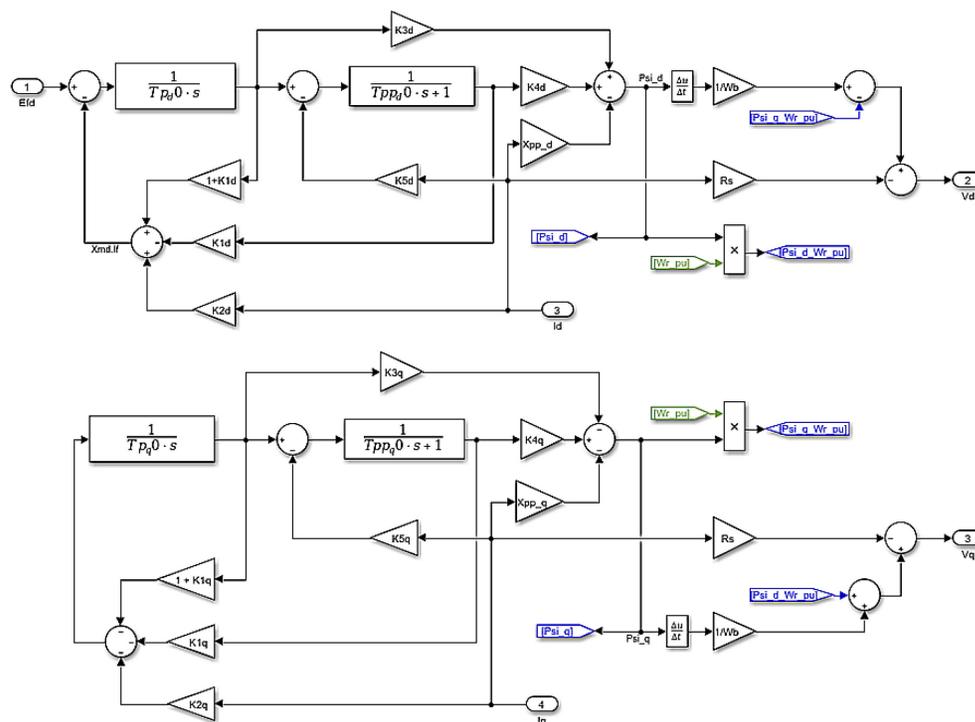


Figure 3-3 : Modèle Simulink de la Génératrice Synchrone

La Figure 3-4 montre quelques résultats de simulation Simulink pour le modèle de la GS. Les paramètres utilisés sont donnés dans l'Annexe 4. Dans la Figure 3-4(a), les tensions produites en réponse à un échelon unitaire de E_{fd} (en haut) ainsi que l'évolution des courants (en bas) sont données. Une vitesse mécanique $\omega_m = 1$ pu est appliquée au modèle. On peut observer que la réponse en tension est dominée

par une dynamique du premier ordre de constante de temps $T_G \approx 1.3$ s et de gain $K_G \approx 1$ telle qu'exposée dans la littérature. De plus, la tension terminale se confond avec la tension d'axe q ($v_d = 0$), ce qui est aussi un résultat bien connu pour une génératrice à vide ($i_d = i_q = 0$). Le courant de champ suit la même dynamique tout en exhibant un subtransitoire (voir zoom) un peu plus prononcé. La lenteur de la dynamique observée devra être corrigée par le régulateur de tension.

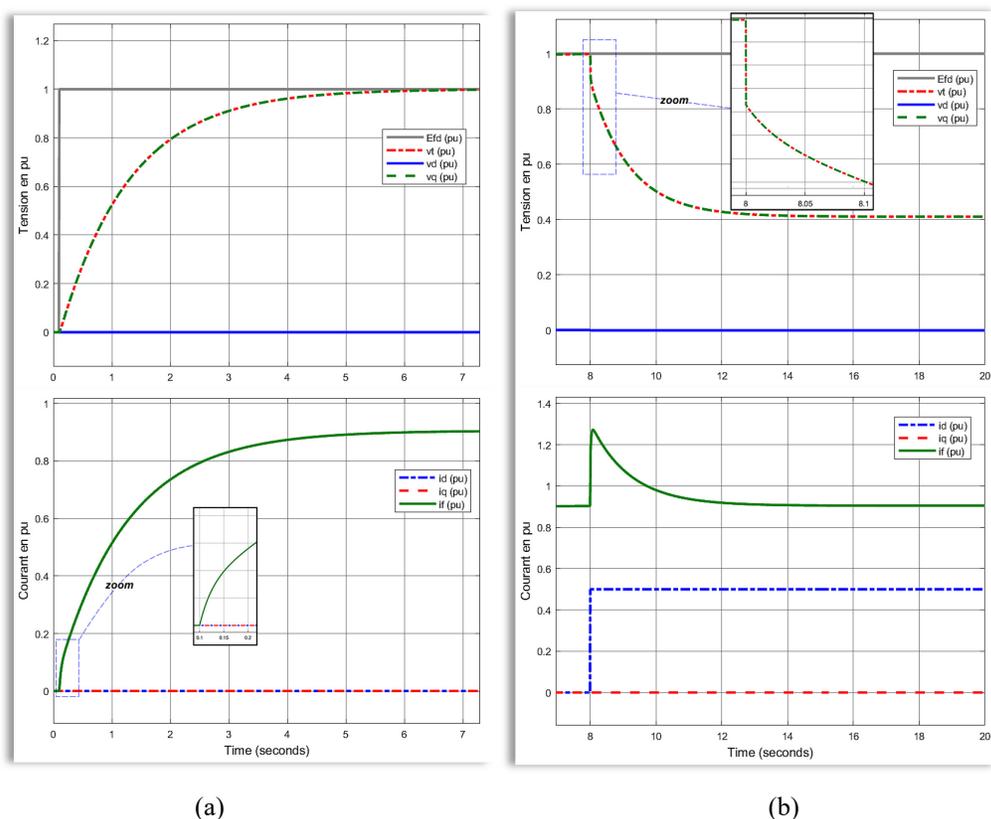


Figure 3-4 : Vérification du modèle de la GS: (a) Réponse à un échelon de commande E_{fd} de la génératrice synchrone; (b) réaction à une montée en charge sur l'axe d (inductance).

La Figure 3-4(b) montre la réaction à une montée en charge instantanée sur l'axe d uniquement (fermeture du contacteur principal sur une charge fortement inductive).

Un pic de courant est observé au niveau du champ et la valeur initiale est recouvrée 4 s environ. On observe une chute de la tension terminale qui reste dans l'axe q ($v_d = 0$) et la réponse exhibe des dynamiques transitoire et subtransitoire (voir zoom) telles qu'indiquées dans le standard IEEE-115 [13]. Le rôle du régulateur de tension sera aussi d'éliminer autant que possible cet impact du courant sur la tension terminale.

3.2.4 Le régulateur de vitesse

Les références [15, 25, 32, 33, 37, 38, 48] et [49] présentent un ensemble de modélisations axées sur la régulation de vitesse d'un groupe turbine alternateur (GTA). De prime abord, le régulateur de vitesse vise à obtenir une fréquence régulée à 60 Hz (1 pu), donc une vitesse de rotation nominale ($\omega_m = 1$ pu) au niveau de l'arbre du GTA. Les régulateurs classiques sont de type mécanique et hydraulique tels qu'illustrés par l'**Annexe 12**. La vitesse ω_m est mesurée à l'aide d'un système à "balles volantes" qui provoquent un déplacement $d = f(\omega_m)$ sous les effets des forces centrifuges et de la gravité. Cette mesure de vitesse est traduite par des forces actionnant la position de vannage g via des systèmes de leviers et de servomoteurs et vérins hydrauliques. Ainsi, l'admission d'eau dans la turbine est constamment corrigée de manière à maintenir sa vitesse de rotation. Un tel système a été proposé pour le SACH dans [25].

Tel que présenté dans les modèles de la section 3.2.2, les systèmes de conversion de la puissance hydraulique est à phase non-minimales (le zéro rends son inverse est instable) et ce dernier possède une réaction négative lors d'un changement brusque de la position de vannage. Par ailleurs, les réactions dynamiques du capteur et des actionneurs et pré-actionneurs sont parfois complexes et difficiles à prendre en compte.

Le modèle de régulation donné à la Figure 3-5 est couramment employé pour la mise au point des régulateurs de vitesse [11, 32]. Les réactions du système de contrôle (stabilité permanente et réactivité transitoire) de la turbine sont paramétrées par R et R_T . Le servomoteur pilote possède une constante de temps T_p et commande la vitesse de déplacement du vannage représentée par un intégrateur. Le régulateur transitoire réglé par R_T permet de compenser le pôle T_w^{-1} de la turbine. Le régulateur permanent réglé par R^{-1} assure une action proportionnelle en régime permanent. Lorsque ce paramètre est assez grand, le moindre écart $\Delta\omega = \omega_{ref} - \omega_m$ produit une forte réaction du vannage qui rattrape rapidement l'écart observé. Cependant, des valeurs trop élevées peuvent mener à l'instabilité de la boucle de régulation.

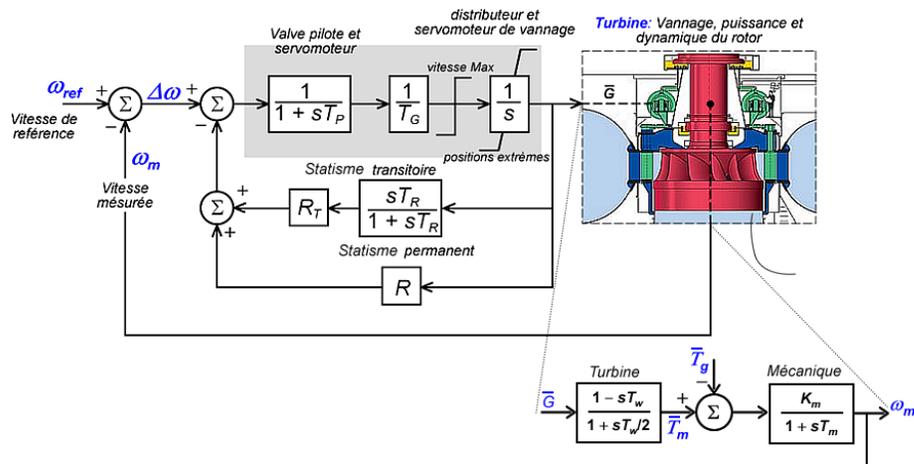


Figure 3-5 : Modélisation de la régulation de vitesse dans une centrale hydroélectrique

La fonction de transfert en boucle ouverte de la régulation de vitesse est donnée par (3.45) où $G_{con}(s)$ englobe la dynamique interne des équipements de contrôle explicité par (3.46)-(3.48). On peut observer qu'en régime permanent, la commande de vannage est proportionnelle à l'erreur observée. En remplaçant $G_{con}(s)$ dans

(3.45) on obtient la relation où on observe que la constante de temps du statisme transitoire T_R peut être réglée pour compenser le retard de phase introduit par le zéro ($1/T_w$) de la fonction de transfert de la turbine. Par ailleurs, le gain en boucle fermée en régime permanent est donné par (3.50) et on observe que le statisme permanent R doit être maintenu nul si l'on veut un fonctionnement isochrone. Cependant, un R nul réduit grandement les marges de stabilité de la boucle de contrôle de vitesse (correcteur infiniment sensible) et le réglage doit se faire pour obtenir une bonne rigidité ($G_{bf}(s)|_{s \rightarrow 0} \approx 1$) avec une marge de stabilité acceptable.

$$G_{bo}(s) = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} = G_{con}(s) \frac{K_m}{1+sT_m} \frac{1-sT_w}{1+sT_w/2} \quad (3.45)$$

$$G_{con}(s) = \frac{\bar{G}}{\Delta\omega} = \frac{\frac{1}{sT_G} \frac{1}{1+sT_P}}{1 + \frac{1}{sT_G} \frac{1}{1+sT_P} \left(R + \frac{sR_T T_R}{1+sT_R} \right)} = \frac{\frac{1}{sT_G(1+sT_P)}}{1 + \frac{R+s(R+R_T)T_R}{sT_G(1+sT_P)(1+sT_R)}} \quad (3.46)$$

$$\Rightarrow G_{con}(s) = \frac{1+sT_R}{R+sT_G(1+sT_P)(1+sT_R)+s(R+R_T)T_R} \quad (3.47)$$

$$= \frac{1+sT_R}{R+s^2T_G(T_R+T_P)+s^3T_GT_RT_P+s(R+R_T)T_R}$$

$$\Rightarrow G_{con}(s) = \frac{1}{R} \times \frac{1+sT_R}{1+s(1+R_T/R)T_R+s^2T_G(T_R+T_P)/R+s^3T_GT_RT_P/R} \quad (3.48)$$

$$\Rightarrow G_{bo}(s) = \frac{K_m}{R} \times \frac{(1+sT_R)(1-sT_w)}{(1+s(1+R_T/R)T_R+s^2T_G(T_R+T_P)/R+s^3T_GT_RT_P/R)(1+sT_m)(1+sT_w/2)} \quad (3.49)$$

$$\Rightarrow G_{bf}(s)|_{s \rightarrow 0} = \frac{\omega_{m\infty}}{\omega_m^{ref}} = \frac{G_{bo}(s)|_{s \rightarrow 0}}{1+G_{bo}(s)|_{s \rightarrow 0}} = \frac{1}{1+R/K_m} = \frac{1}{1+\gamma} \quad \text{avec } \gamma = \frac{R}{K_m} \quad (3.50)$$

Dans le diagramme de la Figure 3-5, on observe que le couple de la GS (\bar{T}_g) est une variable externe qui perturbe l'évolution de la vitesse. La relation en régime permanent G_{ext} entre le couple \bar{T}_g et la vitesse de rotation régulée est donnée par (3.51) qui montre que le statisme permanent permet de lier la vitesse de rotation au

couple de la GS, qui lui-même est lié à la puissance produite. Cette caractéristique particulière permet de connecter les GTA en parallèle.

$$G_{ext}(s)|_{s \rightarrow 0} = \frac{\omega_m^{ref} - \omega_{m\infty}}{\bar{T}_g} = R \frac{1}{1 + \gamma} \approx R \quad \Rightarrow \quad \omega_{m\infty} \approx \omega_m^{ref} - R \times \bar{T}_g \quad (3.51)$$

Les régulateurs modernes sont constitués de capteurs et d'actionneurs électromécaniques (servomoteurs électriques) plus rapides et flexibles [32]. Le statisme transitoire est remplacé par un correcteur Proportionnel-Intégral-Dérivée (PID) dont la fonction de transfert générale est donnée par(3.52)-(3.53). Le modèle du régulateur électromécanique est schématisé à la Figure 3-6 et la fonction de transfert correspondante est donnée par (3.54). En général, le paramètre dérivé n'est pas requis et on obtient (3.55). Hagihara et al. présentent une analyse détaillée de ces régulateurs dans [37] et proposent le réglage optimal donné par (3.56).

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \frac{s}{1 + sT_D} \quad \text{avec } T_D \approx 0 \quad (3.52)$$

$$\Rightarrow G_{PID}(s) = K_p \frac{1 + sT_I + s^2 K_D/K_I}{sT_I(1 + sT_D)} \quad \text{avec } T_I = \frac{K_p}{K_I} \quad (3.53)$$

$$\Rightarrow G_{con}^{PID}(s) = \frac{1}{R} \times \frac{1 + sT_I + s^2 K_D/K_I}{1 + s \left(\frac{1}{RK_I} + T_I \right) + s^2 \frac{T_D + T_p + RK_D}{RK_I} + s^3 \frac{T_D T_p}{RK_I}} \quad (3.54)$$

$$G_{con}^{PI}(s) = \frac{1}{R} \times \frac{1 + sT_I}{1 + s \left(\frac{1}{RK_I} + T_I \right) + s^2 \frac{T_p}{RK_I}} \quad (3.55)$$

$$K_p \approx 0.8 \frac{T_m}{T_w}; \quad K_I \approx 0.24 \frac{T_m}{T_w^2}; \quad K_D \approx 0.27 T_m \quad \text{ou}$$

$$K_p \approx 0.5 \frac{T_m}{T_w}; \quad K_I \approx 0.125 \frac{T_m}{T_w^2}; \quad K_D = 0 \quad (3.56)$$

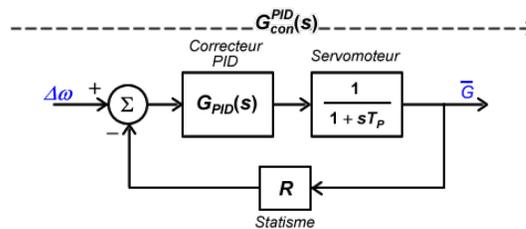


Figure 3-6 : Modèle du régulateur électromécanique de vitesse

La Figure 3-7 présente les courbes obtenues pour le réglage de la boucle de régulation de vitesse. Les paramètres employés sont donnés dans l' **Annexe 3** Vu la multitude des variables d'états utilisés dans ce modèle et les relations non-linéaires qui les lient, il n'est pas aisé de définir des valeurs initiales pour la simulation. Ces dernières sont initialement fixées nulles et le système atteint sa stabilité au temps $t = 60$ s. À partir du temps $t = 100$ s le couple électromagnétique passe brusquement de 0 à 1 pu, ce qui constitue un extrême rarement rencontré en pratique mais qui a l'avantage de mettre à rude épreuve le système de régulation que nous testons. Les courbes de vitesses montrent un bon suivi de la référence. Les courbes de couple montrent que la réaction immédiate du couple hydraulique va en sens contraire de la perturbation. Cependant, les différents compensateurs employés permettent d'assurer une bonne stabilité de la réponse. Le vannage et les débits sont ajustés pour parvenir au rétablissement de la référence.

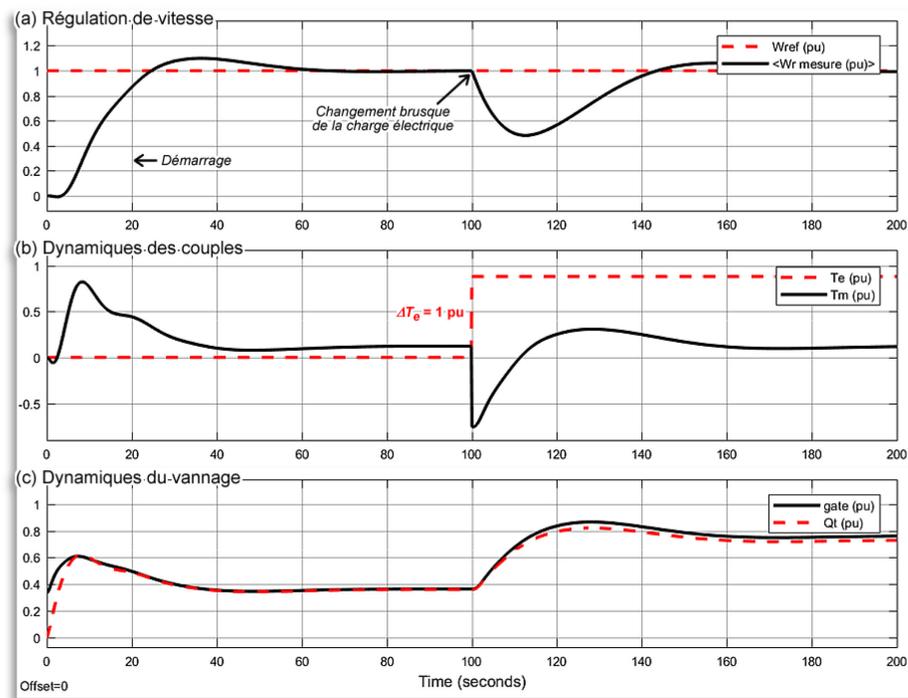


Figure 3-7: Courbes Simulink de vérification de la boucle de régulation de vitesse

3.2.5 Le régulateur de tension

L'ensemble excitatrice et régulateur de tension sont généralement étudiés comme un ensemble servant à fournir l'énergie nécessaire au rotor de la GS, de manière à maintenir constante la tension terminale. Les différents types de systèmes d'excitation sont exposés dans [11, 12]. On distingue des excitatrices :

- Courant Continu (DC) utilisant une petite génératrice DC mécanique couplée à l'ensemble rotatif pour produire l'alimentation du champ ;
- Courant Alternatif (AC) utilisant un petit alternateur dont le champ est fixe et l'induit est tournant et relié à un redresseur alimentant le rotor de la génératrice ;

- Et statiques (STA) qui puisent leur alimentation au stator et employant un ensemble de convertisseurs de puissance (redresseurs) pour contrôler le courant d'excitation de la génératrice.

La Figure 3-8 illustre un système d'excitation statique typique [50]. Cette structure est peu coûteuse et tire avantage des récents développements dans les domaines de l'électronique de puissance et la commande digitale. Le courant continu requis pour l'excitation étant en général élevé, un transformateur abaisseur est utilisé pour adapter les niveaux de tension et de courants. Les blocs redresseurs et convertisseurs de courants sont généralement jumelés et réalisés à l'aide de redresseurs à thyristors dont l'angle d'amorçage α est modulé pour ajuster les tensions terminales (V_{abc}). Le contrôle de l'angle d'amorçage est effectué par un système analogique ou digital (Automate programmable) qui mesure les tensions et courants produits et effectue les compensations et calculs nécessaires afin de produire les signaux de régulation ($v_c = \cos(\alpha)$). Le circuit de désexcitation permet d'annuler le courant d'excitation en cas d'arrêt brusque du générateur (fonction de sécurité).

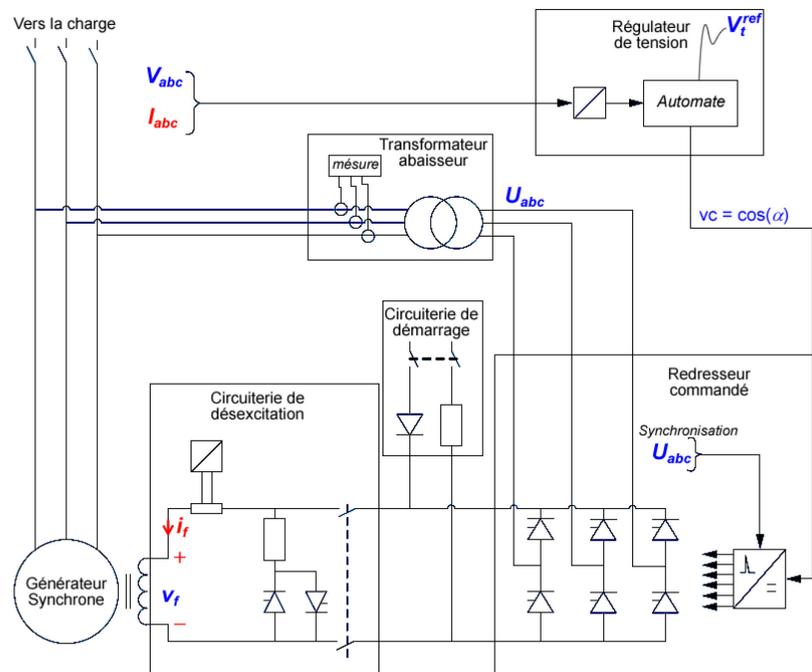


Figure 3-8 : Système de régulation de tension statique type (adapté de [50])

Le standard IEEE std.421.5 [14] regroupe des modèles applicables pour les simulations numériques des régulateurs de tension. La Figure 3-9 donne le modèle proposé pour l'excitatrice du SACH. Ce modèle statique reprenant les grandes lignes conceptuelles développées dans le standard IEEE 421.5. Le redresseur à thyristors (amplificateur) est modélisé par une fonction de transfert du premier ordre de gain K_A et de constante de temps T_A . Le gain K_A est fonction des tensions triphasées redressées. La tension continue V_A produite par le redresseur est soumise à une chute de tension inductive $R_d \times i_f$ telle qu'exposé dans [51] traitant de la conception d'une excitation statique pour les turbines de grande puissance. Pour obtenir la variable E_{fd} utilisée dans le modèle de GS, la tension de champ v_f est multipliée par le rapport x_{md}/r_f . Pour simplifier l'analyse de la boucle de régulation, la dynamique de la GS est assimilée à celle de constante de temps dominante, ce qui correspond au régime transitoire. Le filtre de mesure est aussi supposé rapide par

rapport aux autres dynamiques du système. Les structures de commande modernes sont implémentées via des automates programmables embarquant entre autres un correcteur PI, un système de synchronisation/déclenchement des thyristors. La structure d'excitation est aussi améliorée par l'ajout d'une boucle de compensation locale permettant d'améliorer la dynamique en tension de l'excitation. Par ailleurs, une compensation supplémentaire de la ligne/transformateur de transport peut être ajoutée lorsque l'on veut réguler la tension sur la barre de raccordement au réseau externe. Plusieurs autres signaux de commande (V_{aux}) peuvent être utilisés pour intégrer des fonctions connexes telles que la stabilisation de puissance (PSS) [14, 40].

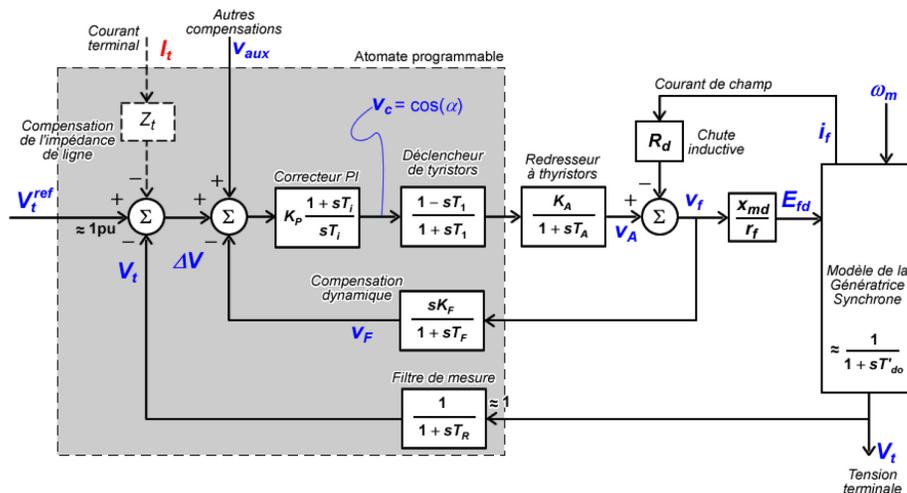


Figure 3-9 : Modèle proposé pour le système d'excitation

La fonction de transfert du contrôleur, avec la compensation interne (v_F) est donnée par (3.57)-(3.58). On observe que la structure de contrôle est dominée par un intégral qui assure un gain en régime permanent infini, d'où une erreur de régulation nulle. En effet, la commande de l'amplificateur se stabilise si $\Delta V_\infty \rightarrow 0$. Par ailleurs, le pôle du compensateur ($1/T_F$) peut être utilisé pour compenser le retard de phase introduit par le déclencheur du redresseur. Le zéro du correcteur PI quant

à lui est utilisé pour compenser les retards de phases internes à la génératrice. La fonction de transfert en boucle ouverte $G_{bo}(s)$ est donnée par (3.59). Les différents leviers de contrôles sont les gains et les constantes de temps K_p , K_f , T_i et T_f . Les autres paramètres sont fixés par la construction du système.

$$G_i(s) = \frac{v_f}{\Delta V} = \frac{K_p \frac{1+sT_i}{sT_i} \frac{1-sT_1}{1+sT_1} \frac{K_A}{1+sT_A}}{1 + \left(K_p \frac{1+sT_i}{sT_i} \frac{1-sT_1}{1+sT_1} \frac{K_A}{1+sT_A} \right) \frac{sK_F}{1+sT_F}} \quad (3.57)$$

$$\Rightarrow G_i(s) = \frac{1}{s} \times \frac{(1+sT_i)(1-sT_1)(1+sT_f)}{(1+sT_1)(1+sT_A)(1+sT_f)T_i/K_pK_A + K_f(1+sT_i)(1-sT_1)} = \frac{1}{s} G'_i(s) \quad (3.58)$$

$$G_{bo}(s) = K_A \frac{x_{md}}{r_f} \frac{1}{s(1+sT_A)(1+sT'_{do})} G'_i(s) \quad (3.59)$$

Le modèle du régulateur de vitesse a été validé sous Simulink en utilisant les paramètres de l'**Annexe 3** et les courbes obtenues sont données à la Figure 3-11, et la Figure 3-10 donne un aperçu dudit modèle. Observons que la simulation est effectuée en utilisant le modèle complet de la GS et les grandeurs sont en unités relatives (pu). La tension de champ v_f est multipliée par 100 pour être affichée sur le même graphique que la tension terminale.

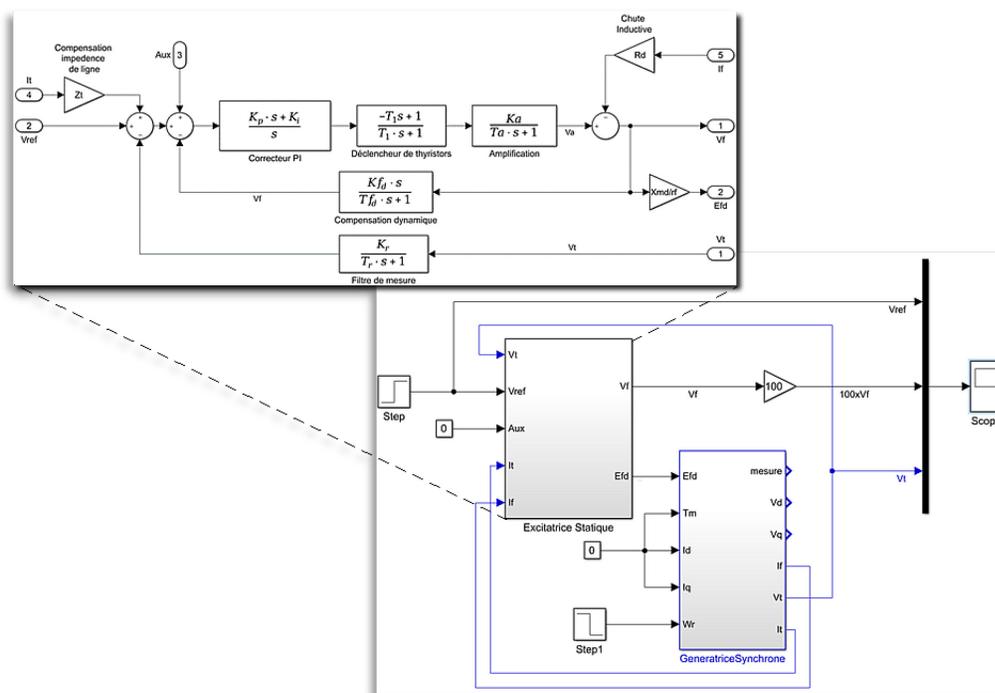


Figure 3-10 : Modèle Simulink de validation du régulateur statique

Le régulateur est réglé suivant les directives précédemment données. On observe notamment que le gain proportionnel a un impact majeur sur le temps de réponse mais fait aussi apparaître des oscillations transitoires tandis que le gain intégral assure une erreur nulle et une réduction des oscillations. Au démarrage la tension terminale est asservie à la tension de référence comme prévue et se stabilise à 1 pu. Lorsque survient une variation de vitesse ω_m (passant de 1 pu à 0.9 pu à l'instant $t = 2.5$ s) le régulateur réagit en réajustant la tension de champ pour rétablir la tension terminale à 1 pu.

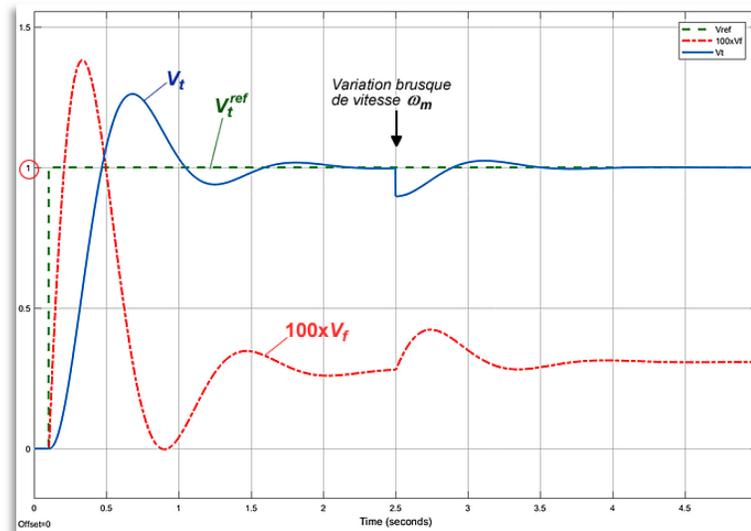


Figure 3-11 : Validation du régulateur de tension statique : démarrage et réaction à une perturbation de vitesse

3.2.6 La gestion des réservoirs

Ce qui démarque le SACH d'une centrale hydroélectrique réelle, c'est la présence des deux réservoirs (supérieur et inférieur) qui sont de capacités limitées. Ainsi, le niveau d'eau en amont peut varier dans de grandes proportions si aucune mesure n'est prise. Un actionneur centré autour de la pompe de recirculation d'eau est prévu à cet effet. Cet actionneur doit être commandé de manière adéquate pour contrôler (réguler) la hauteur de chute et simuler la grande capacité du barrage de retenue d'une centrale réelle. Pour cela nous commençons par modéliser le système de recirculation d'eau entre les réservoirs, puis nous élaborons le régulateur de niveau d'eau. Vu la taille du dispositif à modéliser, nous admettons les hypothèses de conduites rigides et de fluides incompressibles utilisés dans la modélisation de la conduite forcée (voir section 3.2.1).

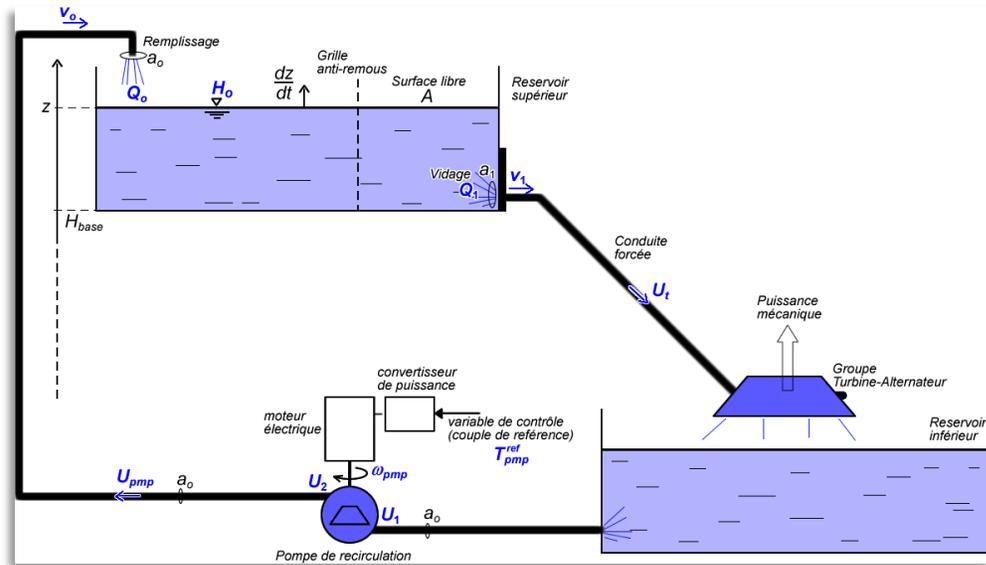


Figure 3-12 : Vue d'ensemble du circuit de recirculation d'eau

La Figure 3-12 présente une vue d'ensemble du système principal de recirculation d'eau dans le simulateur. Le bassin supérieur est rempli par la pompe et vidé par la production de puissance via la conduite forcée. L'équation de continuité pour un liquide incompressible est donné par (3.60) que l'on peut écrire pour le remplissage et le vidage du bassin supérieur tel que donnés par (3.61) et (3.62) respectivement. A est la surface libre de l'eau dans le bassin supérieur, a_o et a_i sont respectivement les sections des conduites de remplissage et de vidage. La vitesse du niveau d'eau est une combinaison des deux actions (remplissage et vidage), et on a l'expression (3.63) où z est l'altitude du front d'eau dans le bassin supérieur. La vitesse de la hauteur de chute H_o est donnée par (3.65) dont l'équivalent en unités relatives est (3.66). \bar{U}_{pump} est la vitesse de l'eau dans la pompe et \bar{U}_t la vitesse de l'eau dans la conduite forcée (en pu).

$$Q = s_1 v_1 = s_2 v_2 \quad (3.60)$$

$$v_o a_o = v' A \Rightarrow v' = \frac{a_o}{A} v_o \quad (3.61)$$

$$v_1 a_1 = -v'' A \Rightarrow v'' = -\frac{a_1}{A} v_1 \quad (3.62)$$

$$\Rightarrow v = v' + v'' \Leftrightarrow \frac{dz}{dt} = \frac{a_0}{A} v_0 - \frac{a_1}{A} v_1 \quad (3.63)$$

$$H_0 = H_{base} + z \Rightarrow \frac{dz}{dt} = \frac{dH_0}{dt} \quad (3.64)$$

$$\Rightarrow \frac{dH_0}{dt} = \frac{a_0}{A} v_0 - \frac{a_1}{A} v_1 = \frac{Q_0}{A} - \frac{Q_1}{A} \quad (3.65)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d\bar{H}_0}{dt} = \frac{Q_{base}}{A.H_{base}} (\bar{Q}_0 - \bar{Q}_1) \quad (3.66)$$

En faisant la liaison avec le modèle de la conduite forcée, on a l'expression (3.67). Notons que la vitesse et le débit sont des grandeurs équivalentes lorsqu'elles sont exprimées en valeurs relatives. Par ailleurs le couple mécanique de la pompe de recirculation est donnée par (3.68) où $U_{1,2}$ représentent les vitesses d'entrée et de sortie de la pompe, $r_{1,2}$ les rayons du turbocompresseur à l'admission et au refoulement, Q le débit d'eau et ρ sa masse volumique. Les détails sur l'obtention de cette expression sont donnés dans [52]. Observons que pour un fluide incompressible au niveau de la pompe, on a $U_2 = U_1 = U_{pmp}$. En remplaçant le débit on obtient (3.69) qui montre que le carré de la vitesse de l'eau dans la conduite de remplissage est proportionnelle au couple mécanique de la pompe. En contrôlant ce dernier, on peut agir sur la hauteur de chute tel que donné par (3.67). En unités relatives, on obtient (3.70). Ainsi, une boucle de contrôle du niveau d'eau est construite en fermant le système sur un correcteur PI.

$$\frac{d\bar{H}_0}{dt} = \frac{Q_{base}}{A.H_{base}} (\bar{U}_{pmp} - \bar{U}_t) \quad (3.67)$$

$$T_{pmp} = \rho Q (U_2 r_2 - U_1 r_1) \Rightarrow T = \rho Q U (\Delta r) \text{ avec } \Delta r = r_2 - r_1 \quad (3.68)$$

$$\Rightarrow T_{pmp} = \rho a_o U_{pmp}^2 (\Delta r) \Rightarrow U_{pmp}^2 = \frac{1}{\rho a_o (\Delta r)} T_{pmp} = K_{pmp} T_{pmp} \quad (3.69)$$

$$U_{base}^2 = K_{pmp} T_{base} \Rightarrow \bar{U}_{pmp}^2 = \bar{T}_{pmp} \text{ en pu} \quad (3.70)$$

Le modèle de test sous Simulink est donné à la Figure 3-13. La variable de contrôle c_{pmp} est la racine carrée de la référence de couple appliqué au convertisseur alimentant la pompe. Pour plus proche de la réalité, on admet que le débit de l'eau s'établit suivant une dynamique du premier ordre de constante de temps τ_{pmp} . Le modèle de contrôle de la hauteur de chute est couplé à celui de la conduite forcée et de la turbine pour évaluer l'impact de la régulation du niveau d'eau. Les courbes de simulation sous Simulink sont données à la Figure 3-14.

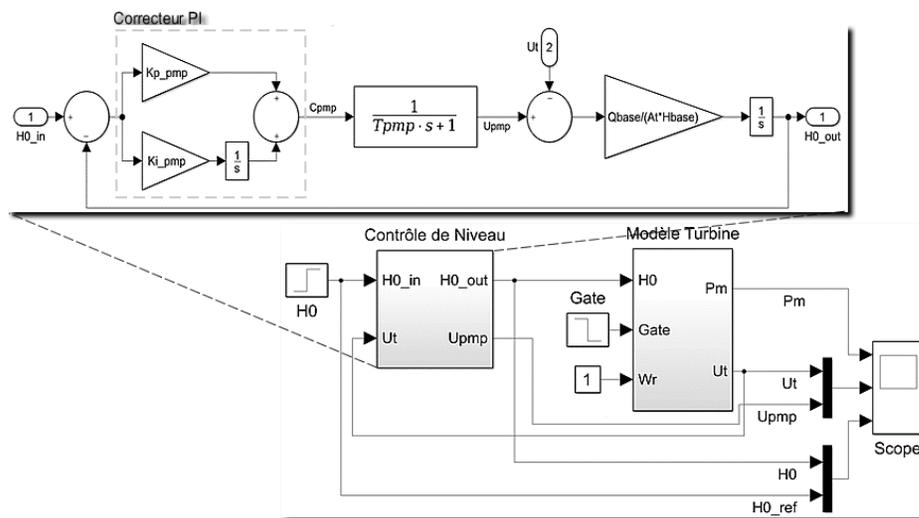


Figure 3-13 : Modèle de régulation du niveau d'eau dans le bassin supérieur

On peut observer que le niveau de l'eau dans le bassin supérieur suit la référence lorsque l'on change la référence. Lorsque l'on agit sur le vannage pour varier le débit dans la conduite forcée, la hauteur de chute est maintenue constante par son correcteur PI. Par ailleurs, on observe qu'en régime permanent, le débit de remplissage du bassin supérieur est égal au débit de vidage et il s'ensuit que la pompe de recirculation est indirectement asservie à la production de puissance.

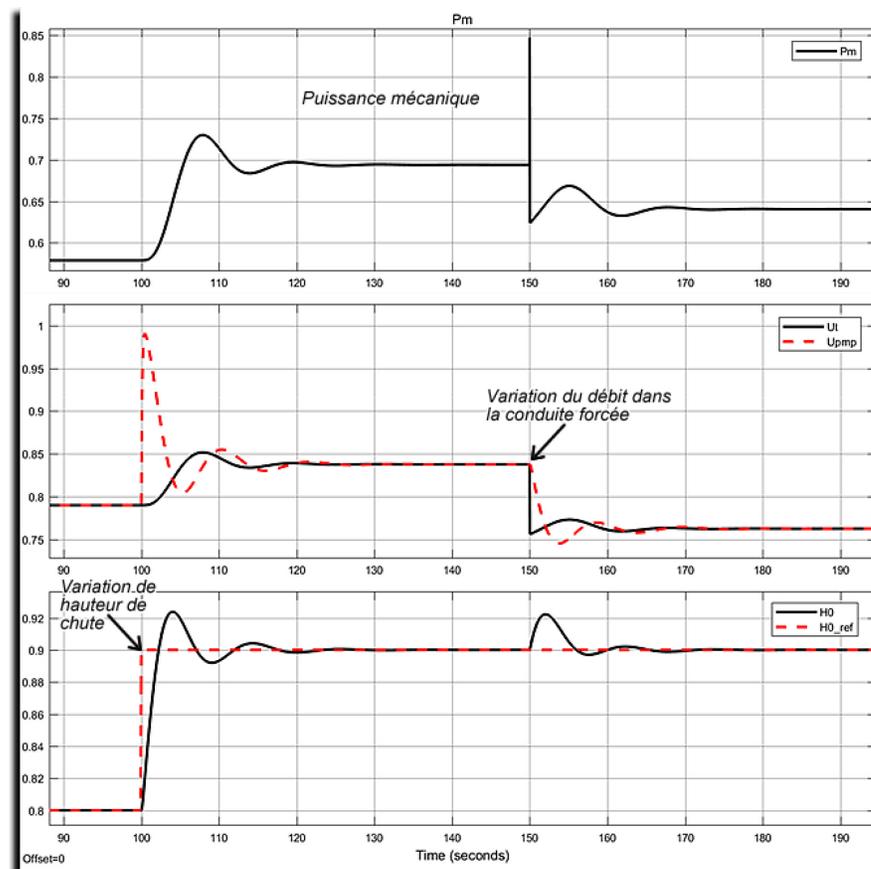


Figure 3-14 : Validation du contrôle de la hauteur de chute sous Simulink

3.3 Modélisations des charges électriques

En situation de démonstration en laboratoire le SACH sera le plus souvent branché à une charge linéaire locale (circuits RLC) ou à une autre source émulant le bus infini (l'alimentation secteur). Ainsi, Il peut fonctionner en mode autonome (en îlot) ou connecté à un réseau fort qui lui impose une tension et une fréquence de fonctionnement (voir Figure 3-15). Dans la présente section nous présentons un ensemble de modèles dynamiques compatibles avec les développements effectués précédemment. Dans chaque cas, la charge reçoit en entrée les tensions terminales v_{dq} de la GS et lui retourne les courants absorbés i_{dq} .

3.3.1 Connexion à un bus infinie

Dans le cas du fonctionnement en mode connecté, la génératrice est reliée au réseau via un transformateur qui adapte les niveaux de tensions de la génératrice à celle du réseau. Le transformateur représenté par son impédance totale série se résume à des inductances de faibles valeurs sur chaque ligne. La dynamique des courants échangés avec le réseau est liée à la différence de potentiels aux bornes des inductances de liaisons telles que données par (3.71) où L_t est l'inductance de raccordement au réseau, v_{gdq} la tension du réseau et ω_e sa pulsation. v_{dq} et i_{dq} sont respectivement les tensions et les courants de la GS. En unités relatives, on obtient l'expression (3.72). En général, l'angle de Park est choisi de manière à avoir la tension du réseau alignée sur l'axe q. La puissance active échangée avec le réseau en régime permanent est liée au couple de la GS. On peut réécrire (3.51) pour trouver le couple mécanique lorsque la vitesse de rotation est fixée tel que donné par (3.74). On peut observer que grâce au statisme permanent, le régulateur de vitesse se transforme automatiquement en contrôleur de puissance lorsque la charge est un bus infini. Par ailleurs, les puissances actives et réactives en termes des grandeurs terminales sont données par (3.75) et (3.76) où δ est l'angle (de puissance) entre le réseau et la génératrice. On en déduit (3.77) qui montre que l'on peut agir sur le régulateur de tension pour contrôler la puissance réactive en mode connecté.

$$L_t \frac{di_{abc}}{dt} = v_{abc} - v_{gabc} \Rightarrow L_t \frac{di_{dq}}{dt} + L_t \omega_e W i_{dq} = (v_{dq} - v_{gdq}) \text{ avec} \quad (3.71)$$

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \frac{di_{dq}}{dt} = \omega_b \left[-\omega_m W i_{dq} + \frac{1}{x_t} (v_{dq} - v_{gdq}) \right] \text{ en pu} \quad (3.72)$$

$$\omega_{m\infty} \approx \omega_m^{ref} - R \times \bar{T}_g \Rightarrow \bar{T}_g \approx \frac{\omega_m^{ref} - \omega_{m\infty}}{R} \quad (3.73)$$

$$P_g = T_g \omega_{m\infty} \approx \frac{\omega_{m\infty}}{R} (\omega_m^{ref} - \omega_{m\infty}) = \frac{1}{R} (\omega_m^{ref} - 1) \quad \text{avec} \quad \omega_{m\infty} = \omega_{réseau} = 1 \text{ pu} \quad (3.74)$$

$$P_g = \frac{V_t V_g}{x_t} \sin(\delta) \Rightarrow V_t \sin(\delta) = P_g x_t \quad (3.75)$$

$$Q_g = \frac{V_g}{x_t} (V_t \cos(\delta) - V_g) \Rightarrow V_t \cos(\delta) = Q_g x_t + 1 \quad (3.76)$$

$$\Rightarrow V_t^{ref} = \sqrt{x_t^2 (P_{ref}^2 + Q_{ref}^2) + 2Q_{ref} x_t + 1} \quad (3.77)$$

3.3.2 Connexion à une charge RL série

La Figure 3-15(b) schématise la connexion à une charge RL-série. On peut reprendre l'équation (3.72) en notant que les tensions V_{gdq} dans ce cas sont le produit de la résistance de charge R (ou r en pu) par les courants absorbés i_{dq} . Le modèle de charge RL-série se résume alors par (3.78).

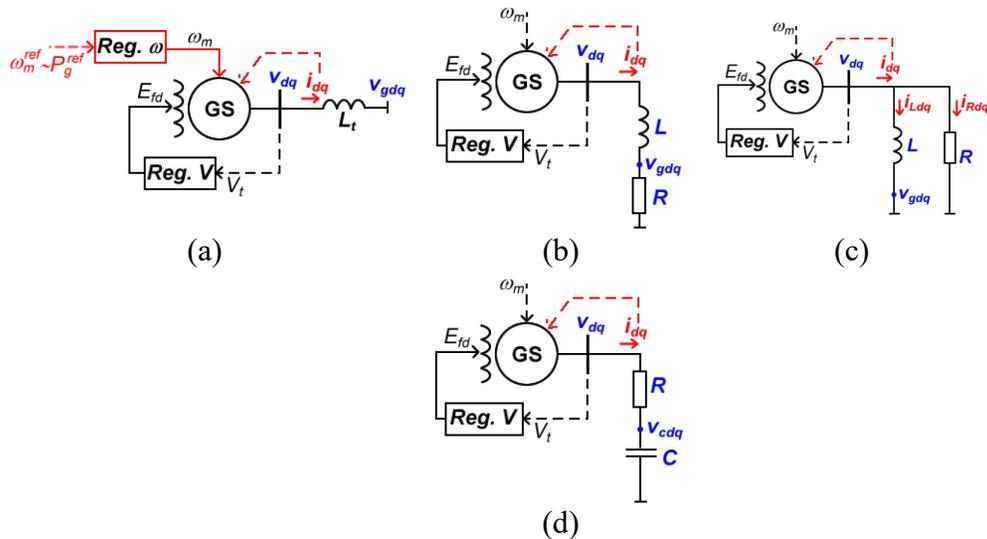


Figure 3-15 : Modélisations de la charge du simulateur: (a) le bus infini; (b) la charge RL-série; (c) la charge RL-parallèle; Charge RC-série.

$$\frac{di_{dq}}{dt} = \omega_b \left[-\omega_m W i_{dq} + \frac{1}{x} (v_{dq} - r i_{dq}) \right] \quad \text{en pu, avec} \quad W = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad I_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Le principal intérêt de modéliser une charge RL série réside dans la possibilité de réaliser aisément des simulations de délestage/enclenchements en admettant que la résistance possède une partie variable (nulle ou très grande) simulant les états d'un contacteur.

3.3.3 Connexion à une charge RL-parallèle

La Figure 3-15(c) schématise la connexion à une charge RL-parallèle. On peut observer que dans ce cas, les tensions v_{gdq} sont nulles et le courant terminal est la somme du courant dans l'inductance et du courant dans la résistance parallèle. On écrit alors (3.79). La charge parallèle quant à elle permet d'avoir un certain contrôle indépendant de la puissance active et de la puissance réactive de la charge.

$$\frac{di_{Ldq}}{dt} = \omega_b \left(-\omega_m W i_{Ldq} + \frac{1}{x} v_{dq} \right) \quad \text{et} \quad i_{dq} = i_{Ldq} + \frac{1}{r} v_{dq} \quad (3.79)$$

3.3.4 La charge RC-série

Pour la charge RC-série (voir Figure 3-15(d)) le courant produit (en pu) est donné par (3.80), et la dynamique de la tension aux bornes du condensateur par (3.81). La charge RC permet également de simuler le délestage d'une charge capacitive qui traduit les conditions courantes des essais de délestage en centrale, la génératrice absorbe alors une puissance réactive.

$$i_{dq} = \frac{v_{dq} - v_{cdq}}{r} \quad (3.80)$$

$$\frac{dv_{cdq}}{dt} = \omega_b \left(-\omega_m W v_{cdq} + x_c i_{dq} \right) \quad (3.81)$$

Peu importe la charge considérée, les différentes puissances instantanées se calculent par les formules standards données par (3.82)-(3.83). Les modèles Simulink construits sur la base des équations précédentes sont données à l'**Annexe**

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.82)$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \quad (3.83)$$

3.4 Modélisation de l'ensemble sous Matlab/Simulink

Le modèle de simulation complet du SACH est donné à l'Annexe 16. Il est construit à partir des différents blocs analysés dans les pages précédentes. Le système est entièrement implémenté dans le référentiel synchrone (dq) et les transformations inverses sont employées uniquement pour mimer les instruments de mesures réels (tensions et courants triphasés). Les grandeurs adimensionnelles (pu) sont aussi pour rendre les résultats transposables suivant les valeurs nominales du système hydro-électrique considéré. Par soucis de clarté, des labels de routage de signaux dans Simulink sont utilisés. En haut à gauche le bloc "*UDP Receive*" implémente les opérations d'acquisition des données de contrôle en provenance d'un système extérieur à Simulink, ou même à l'ordinateur exécutant le modèle. Le bloc "*UDP Send*" permet une mise en réseau des résultats de simulation pour chaque pas de simulation. Les blocs du système sont montés suivant le synoptique de la Figure 2-3.

3.5 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les généralités sur le simulateur analogique de centrales hydroélectriques (SACH) et exposé l'état d'avancement des travaux de construction. La structure portante a été construite et divers sous-systèmes sont en cours de construction, notamment le groupe turbine-alternateur (GTA) et le système de recirculation d'eau dans les réservoirs. Pour élaborer la supervision de manière à l'intégrer au SACH finalisé, nous avons présenté une modélisation bloc par bloc basé sur le synoptique du SACH. Ces derniers ont été interreliés pour constituer un modèle global, le plus représentatif possible du système. Le fonctionnement harmonieux de l'ensemble repose sur le réglage du régulateur de vitesse et du régulateur de tension. Pour ces deux sous-systèmes,

l'objectif est le maintien à 1 pu de la grandeur contrôlée. Cependant, pour le régulateur de vitesse, la nécessité d'un statisme permanent (et même transitoire) a été démontré pour l'injection de la puissance dans un réseau électrique. Par ailleurs, les modèles précis pour diverses charges usuelles ont été développés et seront exploités pour mettre en évidence et tester les réactions du SACH faces à certaines situations (démarrage, enclenchement, délestage, etc.). Le développement de l'interface opérateur est présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 4: CONSTRUCTION DU MODULE SUPERVISION DÉPORTÉ DANS LABVIEW

Dans le chapitre précédent, la modélisation du SACH a été présentée et des leviers de surveillance et de supervision ont été implémentés à travers des blocs Simulink de mise en réseau. Le protocole réseau UDP ("*User Datagram Protocol*") a été choisi pour les échanges de données. Le présent chapitre aborde plus en détails la gestion du SACH à travers ce protocole et la construction de l'interface opérateur (IHM) qui sera validé à travers la commande déportée du modèle Simulink du SACH. L'environnement LabVIEW ("*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*"), qui est une plate-forme spécialisée dans la construction de systèmes de mesure/contrôle industriels, est le principal outil employé.

4.1 Présentation de l'environnement de développement intégré LabVIEW

Le développement de la technologie informatique a beaucoup évolué ces décennies. L'inclusion de logiciels d'instruments virtuels dans la simulation des systèmes de contrôle a entraîné l'amélioration de la formation des apprenants [53]. Le logiciel LabVIEW produit par la firme National InstrumentsTM (NI) est un environnement de développement graphique permettant de prototyper et de créer des applications de test, de mesure et de contrôle [27].

Contrairement aux outils de développements traditionnels le système n'est pas implémenté sous forme de lignes de code (script Matlab ou C/C++ par exemple) mais à travers un graphique dont l'unité de base est appelée instrument virtuel (VI). L'apparence ou l'icône employé pour représenter le VI donne des indices sur sa fonction (oscilloscope, voltmètre, ampèremètre, enregistreur, etc.). Une aide

contextuelle permet d'obtenir de l'information de base (entrées, sorties, types de données, paramètres, utilité) sur l'exploitation d'un VI.

Pour la recherche scientifique, l'IDE LabVIEW facilite la connexion du chercheur aux signaux et instruments réels en masquant leur complexité, ce qui laisse plus de place aux principes étudiés. Par ailleurs, il est rendu très complet à travers les modules "*Math Script*" permettant d'intégrer des logiques procédurales suivant la logique employée dans Matlab® qui est largement exploité par les scientifiques à travers le monde. Cependant, le Diagramme de Flot de Contrôle (DFC) est le langage natif de LabVIEW. Il fait appel aux éléments graphiques inters reliés par des signaux de données (lignes graphiques) pour constituer des fonctions et des comportements. La référence [24] présente une comparaison détaillée entre Matlab et LabVIEW.

Le programme LabVIEW est constitué (i) d'une face avant regroupant des contrôles (boutons, voyants, afficheurs) de tous les VI utilisés et (ii) d'un diagramme fonctionnel (ou diagramme de flux) représentant la logique sous-jacente animant la face avant tel que présenté à la Figure 4-1. Ainsi, tout projet LbV est constitué d'un VI maître et chaque composante ajoutée est un sous VI. La face avant possède aussi les contrôles Windows standard (agrandir, réduire, redimensionner ou fermer la fenêtre) et le développeur n'a pas à bâtir de nouveaux. Sur le modèle du VI principal, chaque sous-VI est constitué (i) d'une face-avant (leviers de commande) et (ii) un élément du diagramme fonctionnel (comportement). La Figure 4-2 donne quelques primitives de graphique LbV. Les références [22, 23, 28] exposent des projets scientifiques réalisés avec LbV.

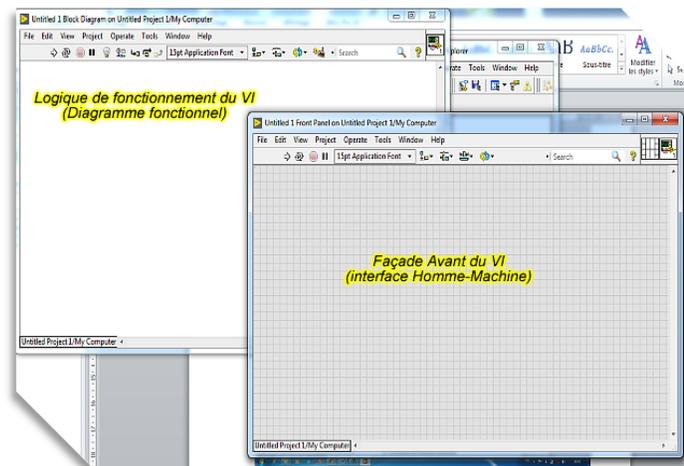


Figure 4-1 : feuilles de façade avant (interface homme-machine) et de diagramme fonctionnel

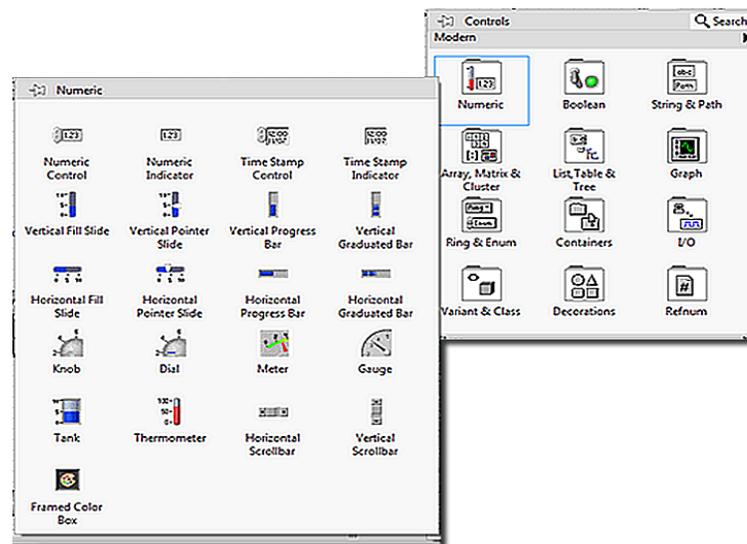


Figure 4-2 : Objets et contrôles graphiques de bases

4.2 Communication réseau et protocole UDP

4.2.1 Structure des données et piles TCP/IP

Un réseau informatique est un ensemble d'équipements, traditionnellement des ordinateurs, reliés entre eux pour échanger des informations. Les récents progrès dans le monde de la micro-électronique ont générés plusieurs familles de microcontrôleurs axés sur la communication réseau. Les supports qui véhiculent l'information peuvent être des câbles transmettant des signaux électriques (niveaux de tension ou de courant), l'air (ou le vide) à travers des ondes hertziennes, ou des fibres optiques transmettant des ondes lumineuses. Les échanges harmonieux d'informations via ces moyens physiques sont définis par des protocoles ou normes réseaux qui sont à la base du succès du grand réseau informatique mondial qu'est l'Internet. L'internet des Objets ("*Internet of Things*" ou IoT), qui est l'interconnexion via Internet des processeurs embarqués dans des objets de la vie courante permet d'échanger des données et est un nouveau concept qui mobilise fortement la communauté scientifique dans le monde [54]. Les nouveaux équipements de mesure et de contrôle font largement appel à ce paradigme [55].

Le protocole TCP/IP, exploité à travers un ensemble de sous-routine communément appelé pile TCP/IP (ou TCP-IP stack), est l'un des plus utilisés pour la mise en réseau. La Figure 4-3 donne un aperçu de la liaison TCP/IP élémentaire. Le média physique d'échange de données est régi par les normes Ethernet (ISO/IEC 802-3) et Wifi (IEEE 802.11).

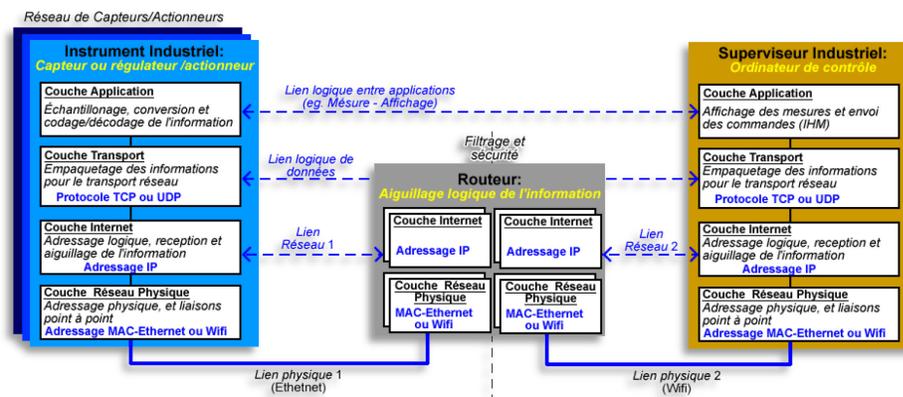


Figure 4-3 : Pile TCP/IP et structures d'échange des données en réseau

Le capteur industriel embarque un microcontrôleur qui utilise ses routines d'application pour échantillonner, convertir et formater les données à transmettre. Ce flux de données est soumis à la couche transport qui ajoute des informations de transport permettant de cibler le port de destination dans l'ordinateur de supervision distant. Les protocoles de transport standardisés sont le TCP ("*Transmission Control Protocol*") permettant d'établir une liaison avec ouverture de session, l'UDP ("*User Datagram Protocol*") sans session, donc plus flexible pour l'utilisateur. Les datagrammes TCP ou UDP sont soumis à la couche Internet qui rajoute de l'information de gestion du cheminement à travers les nœuds du réseau, notamment l'adressage IP. Chaque équipement échange sur le réseau internet et est identifié par son adresse IP (@IP). Le flux de données ainsi codé est soumis à la couche de réseau physique (Ethernet ou Wifi) qui s'occupe de la modulation (tensions, lumière, ondes, etc.) de l'information, découpée en paquets de taille limitée défini par la norme. Le but de cette couche est d'acheminer l'information à l'équipement réseau le plus proche (en bout de lien physique) identifié par son adresse MAC ("*Media Access Control*"). Tout équipement connecté au réseau possédant une adresse MAC unique.

Le réseau est constitué d'équipements d'aiguillage des données, les routeurs, qui reçoivent et redistribuent les données suivant les adresses IP source et destination.

Ces routeurs gèrent des bases de données appelées tables de routage qui peuvent être utilisées pour contrôler l'accès à certains segments du réseau (Sécurité). Dans l'ordinateur distant, le flux de données soumis par la couche application de l'instrument industriel est reçu tel quel par l'application hôte qui peut la traiter. Ainsi, un lien logique couche à couche est établi à travers les échanges réseaux. Des compléments d'informations sur les réseaux industriels peuvent être trouvés dans [56, 57] et les références citées.

4.2.2 Structure de supervision du SACH

L'architecture de gestion et de supervision proposée pour le SACH est donnée à la Figure 4-4. Pour rester compatible avec la majorité des capteurs et actionneurs du commerce, un automate programmable industriel (API) possédant un interface Ethernet est considéré. Les raccordements avec les instruments du SACH (capteurs de niveau, débit, pression, puissance, etc.) se feront via des boucles de courant 4-20mA qui sont des standards industriels bien connus. L'automate effectuera les tâches de contrôle des boucles de régulation sur site et mise en réseau des données (liaison IP avec les IHM). Cette partie a été entièrement implémentée sous Matlab/Simulink au Chapitre 3. L'automate (contrôleur de terrain) sera raccordé à un routeur proche qui permettra de sécuriser l'accès aux processus du SACH, notamment en établissant une liaison privée virtuelle entre tout IHM distant et l'API. L'IHM proprement dit, développé avec l'IDE LabVIEW, peut s'exécuter dans tout ordinateur compatible, c'est à dire possédant le noyau d'interprétation du code LabVIEW, et dont les adresses seront autorisées par la stratégie de sécurité au niveau des routeurs. Notons aussi que le système étant bâti sur des normes réseaux bien établies, il hérite de leur flexibilité qui rends l'IHM ainsi construit partout où une connexion TCP/IP (ou un accès internet) est possible : sur le site du SACH. Par ailleurs, l'IHM proposé peut indifféremment fonctionner avec le modèle Simulink s'exécutant sur un ordinateur muni de l'environnement Matlab/Simulink, ou le SACH réel construit. La seule exigence est la conformité des @IP et les structures

des données (ordre d'apparition dans les flux transmis et reçus). Les résultats obtenus avec le SACH simulé sont exposés dans les sections suivantes.

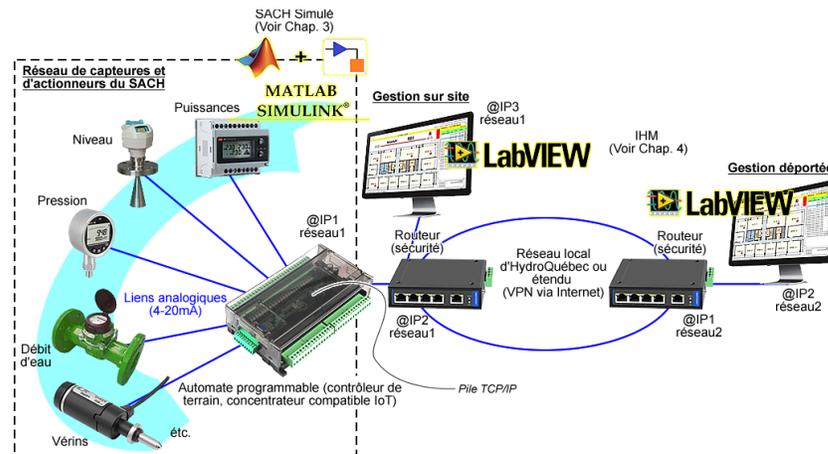


Figure 4-4 : Structure de supervision proposée pour le simulateur analogique

4.2.3 Implémentation réseau sous LabVIEW

Comme précédemment présenté, L'UDP est un protocole de la couche transport (voir Figure 4-3) qui permet la transmission de données entre deux dispositifs. Ce protocole doit indiquer à l'ordinateur distant le "port source" identifiant l'application émettrice, un port de destination indiquant l'application cible, des données à transmettre (reçues de l'application) et une somme de contrôle ("*checksum*") pour la validation de l'intégrité des données transmises. Les modules utilisés pour constituer la connexion entre l'IHM et le SACH (modèle) sont données à l'**Annexe 14**:

- l'ouverture de connexion (a) permet d'établir une connexion UDP entre les différents dispositifs du même réseau, à ce niveau on spécifie le numéro du port de communication, l'adresse IP associé;
- la fermeture de connexion (d) permet l'arrêt de la communication en fonction de l'identifiant de connexion qui lui est donné;
- la lecture de données (b) produit une sortie de donnée sous forme de chaîne de caractères (données en provenance du SACH, 581 octets maximum);

- l'écriture de données (c) autorise le transfert de données vers le SACH.

En somme une interconnexion de données via UDP passe par un modèle complet de communication du protocole intégrant tous les modules présentés précédemment. L'Annexe 15 illustre un modèle UDP complet.

4.3 Présentation face avant et diagramme de flux LabVIEW de l'IHM

4.3.1 Face arrière LabVIEW

Dans l'interface présentée à Figure 4-5, deux trames séquentielles sont utilisées, la première (à gauche) pour la création automatique du fichier de condition initiale de simulation (SACH sous Simulink). On y retrouve les entrées provenant des paramètres entrés par l'utilisateur sur la face avant. Observons que ceci est un séquenceur sur lequel on retrouve les trois groupes de paramètres (Turbine, excitatrice et génératrice synchrone) sous la forme de clusters¹. Les données sont extraites et acheminées vers un code procédural qui se charge de générer un script d'initialisation Matlab exploité pour paramétrer le modèle Simulink. Le second bloc du diagramme de flux (partie droite de la Figure 4-5) est utilisé pour le calcul en temps-réel des variables du système et les échanges via le module UDP.

¹ Structure de donnée LabVIEW regroupant des éléments de données de types différents

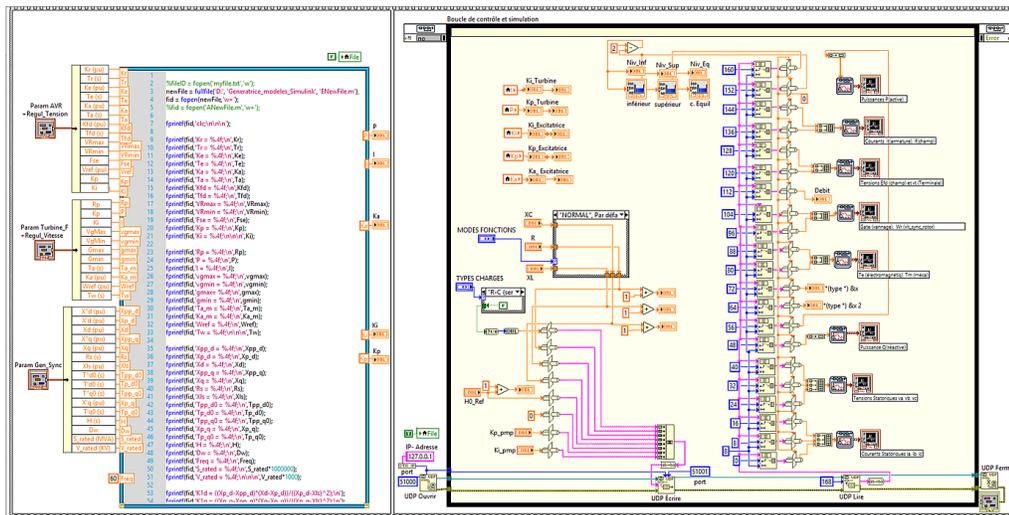


Figure 4-5 : Diagramme de flux LabVIEW de l'IHM

Figure 4-6 : Organisation de la face avant de l'IHM

4.3.2 Face avant LabVIEW

L'interface homme machine (IHM) proposé est présenté à la Figure 10-4-6. Il a été constitué en plusieurs onglets pour regrouper les fonctions et vues suivant le mode d'opération ou les grandeurs à observer. Ainsi, la figure présente un échantillon de vue et les différents onglets sélectionnables : Courbes graphiques de variables, saisie

des paramètres du SACH (utilisé par Simulink), contrôles et commandes (leviers de commande du SACH). La vue échantillon illustre les commandes des régulateurs PID associés au SACH. Le levier mode de fonction permet de simuler différents modes de fonctionnement (Normal, délestage, enclenchement, etc.), tandis que le levier charge la sélection du type de charges.

Chapitre 5: ESSAIS DE VALIDATION DES FONCTIONNALITÉS DE L'INTERFACE OPÉRATEUR

5.1 Introduction

L'interface graphique et la structure globale de l'IHM construit permet à l'utilisateur de tester un ensemble de scénarios pouvant être reproduits sur la microcentrale. Les résultats présentés incluent le comportement de la génératrice synchrone (GS) en réaction aux variations de la charge, pour une certaine configuration des gains des correcteurs PI, ou même des variations de niveau dans le réservoir supérieur. En agissant sur les différents contrôles (leviers de commande) aménagés tel que R , X_L et X_C on peut varier les valeurs des charges associées au système tout en maintenant les autres paramètres, dépendamment du mode que l'on souhaite analyser.

5.2 Démarrage et fonctionnement normal du système

Pour tester le fonctionnement normal du système, nous employons une charge RL-série ($R = 5$ pu et $X_L = 11$ pu). Le système étant considéré à l'arrêt, il démarre avec des valeurs initiales nulles. Les résultats obtenus sur l'IHM sont donnés par la Figure 5-1 à la Figure 5-5. Au niveau de la GS (Figure 5-1) les tensions statoriques qui retrouvent la référence de 1 pu et les courants statoriques se stabilisent à 0,085 pu (courants statoriques) conformément à la charge alimentée. L'IHM permet entre autres d'observer le dépassement (0,5 pu) qui dure environ 2 secondes au niveau des tensions statoriques. Les régulateurs peuvent être ajustés par l'opérateur pour observer l'évolution de ce dépassement.

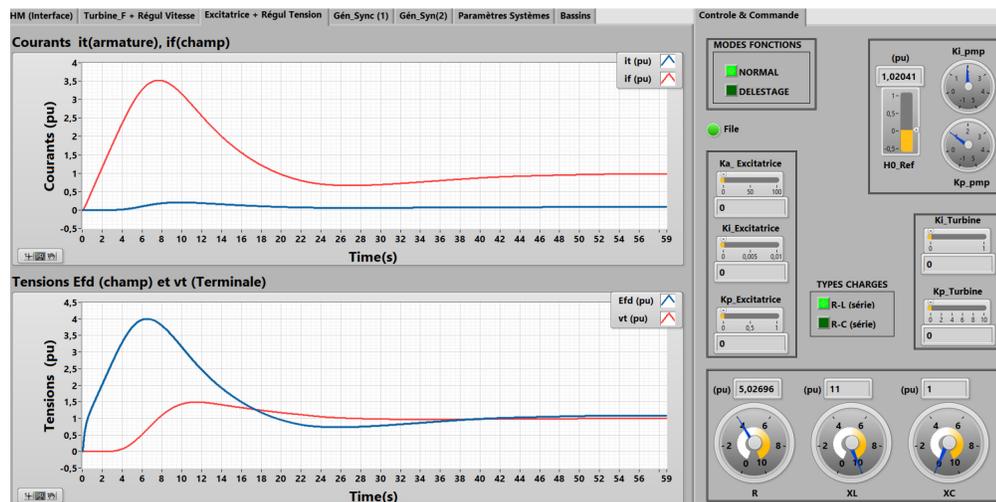


Figure 5-1 : Tension et courant (champ et terminal) au démarrage du système

En ce qui concerne la mécanique, on peut observer l'ouverture maximale des vannes directrices au démarrage (Figure 5-3) pour laisser passer de l'eau et ainsi produire la puissance permettant d'atteindre le régime permanent voulu (1 pu de fréquence et 1 pu de tension). Les régulateurs s'activent pour stabiliser le système, ce qui se

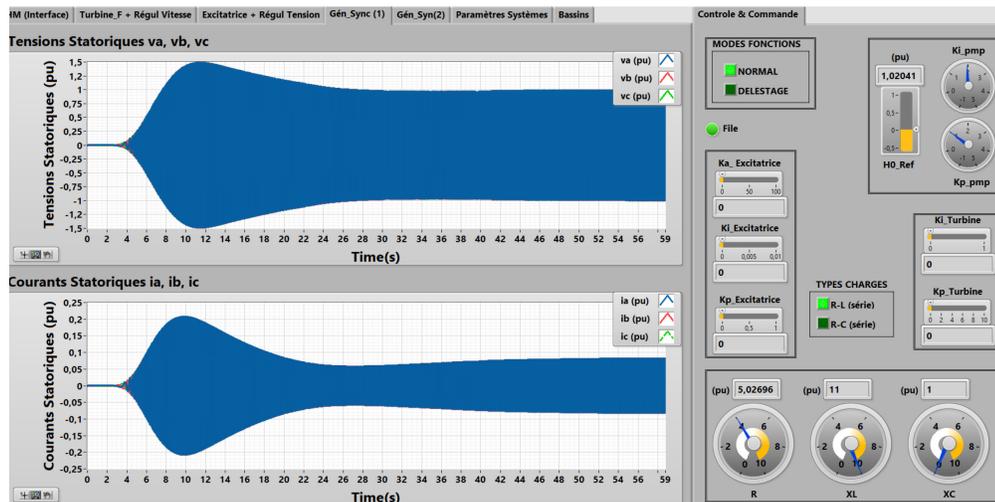


Figure 5-2 : Tensions et Courants Statoriques de la GS au démarrage du système

produit en près de 50s, à partir de cet instant on a $\omega_m = \omega_m^{ref} = 1$ pu (Figure 5-3) et la

tension de champ ainsi que la tension terminale $V_t = V_t^{ref} = E_{fd} = 1$ pu. Le niveau d'eau dans le bassin supérieur se stabilise aussi en 50s avec un dépassement de 0,4 pu en 2s dans sa période transitoire. On constate aussi une ouverture brusque de la pompe de recirculation avec un débit allant jusqu'à 2,9 pu, permettant au système de produire la puissance au besoin avant l'atteinte de son régime permanent, tandis que le débit dans la turbine subit quelques variations.

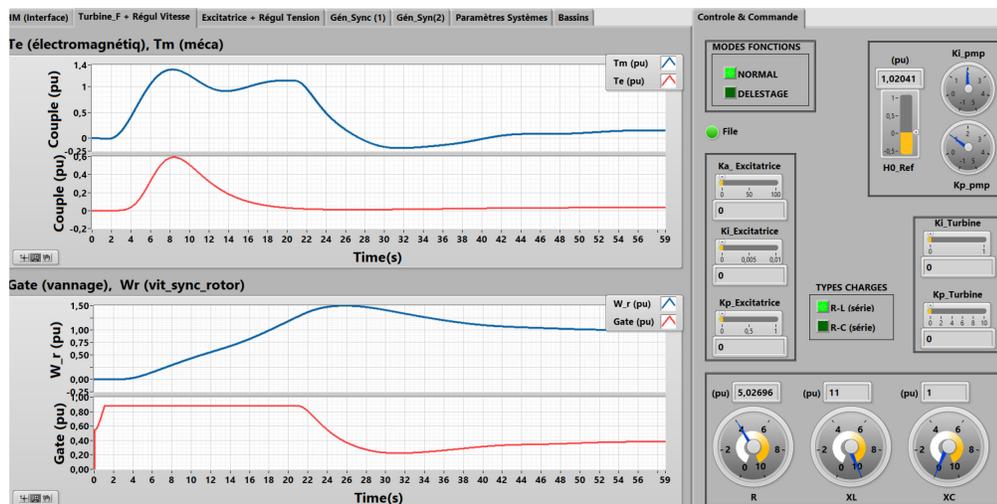


Figure 5-3 : Couple, Vitesse synchrone et vannage au démarrage du système

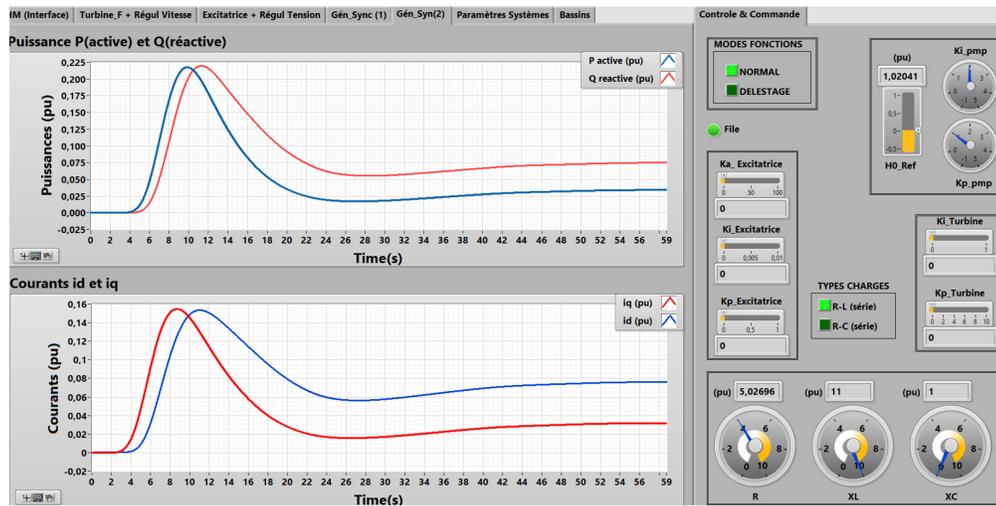


Figure 5-4 : Évolution de la puissance produite ainsi que les courant dans l'axe d et q au démarrage système

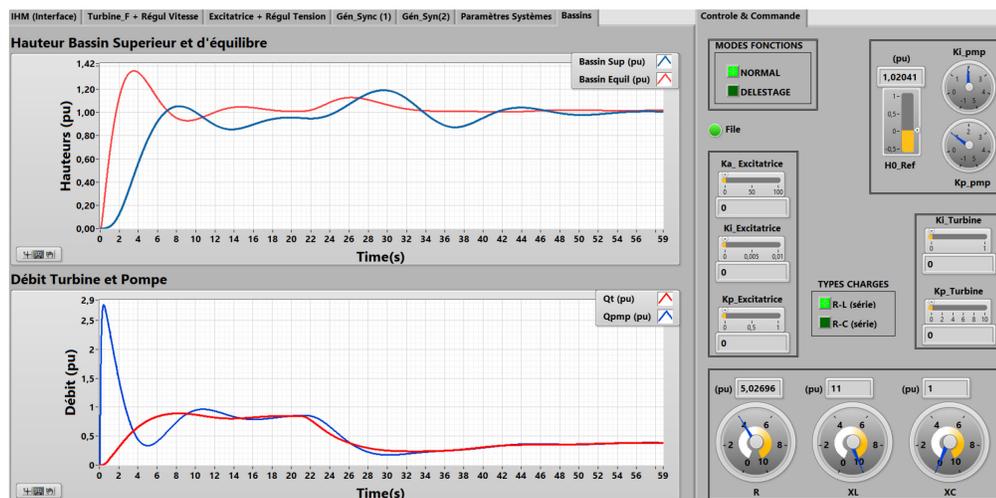


Figure 5-5 : Évolution niveau d'eau dans les bassins et débits (turbine et pompe recirculation)

5.3 Enclenchement et Délestage

Le délestage est un évènement soudain, consistant à ouvrir le disjoncteur principal alimentant la charge. Cette procédure est généralement employée pour évaluer la robustesse des boucles de régulation du système de production et sa capacité à maintenir les paramètres de production face aux transitoires extrêmes. L'enclenchement, consiste à alimenter une charge donnée en fermant le contacteur principal. C'est un autre test permettant d'évaluer la capacité du système à produire une puissance donnée tout en restant stable. Plus concrètement, la simulation du délestage consiste à élever brusquement la valeur de la partie résistive de la charge (1000 pu dans notre cas).

5.3.1 Tests avec la charge RL-série

5.3.1.1 Génératrice initialement à vide

Avec la GS initialement à vide, on enclenche une charge inductive ($X_L = 11$ pu) à l'instant $t = 44.95$ s. Subséquemment, une charge résistive ($R = 11$ pu) est enclenchée en série à $t = 45.81$ s. Enfin, le tout est délesté à $t = 47.21$ s (élévation de la charge à des valeurs extrêmes $R = X_L = 1001$ pu).

Tableau 5-1 : Données de simulations Charges RL (à vide à l'état initial)

Simulation	Impédance résistive (pu)	Impédance Inductive (pu)	$\text{Cos } \varphi$	Puissance active (pu)	Puissance réactive (pu)
A vide	1001	1001	0,7	0	0
Enclenchement	1	11	0,09	0,008	0,084
Enclenchement	11	11	0,99	0,042	0,042
Délestage	1001	1001	0,7	0	0

Les principales grandeurs des boucles de contrôle sont observées. La capture d'écran de l'IHM donné à la Figure 5-6 montre la dynamique des puissances (active et réactive) produite par la GS. Ces puissances sont nulles dans l'intervalle où le

système est à vide. Il en est de même pour les courants terminaux (i_{abc}) affichés sur la capture de la Figure 5-8. Par ailleurs, on observe que les tensions statoriques (V_{abc}) ainsi que la vitesse de rotation (ou la fréquence) du GTA restent dans le voisinage de la valeur de référence (1 pu) tout au long du processus (voir Figure 5-7).

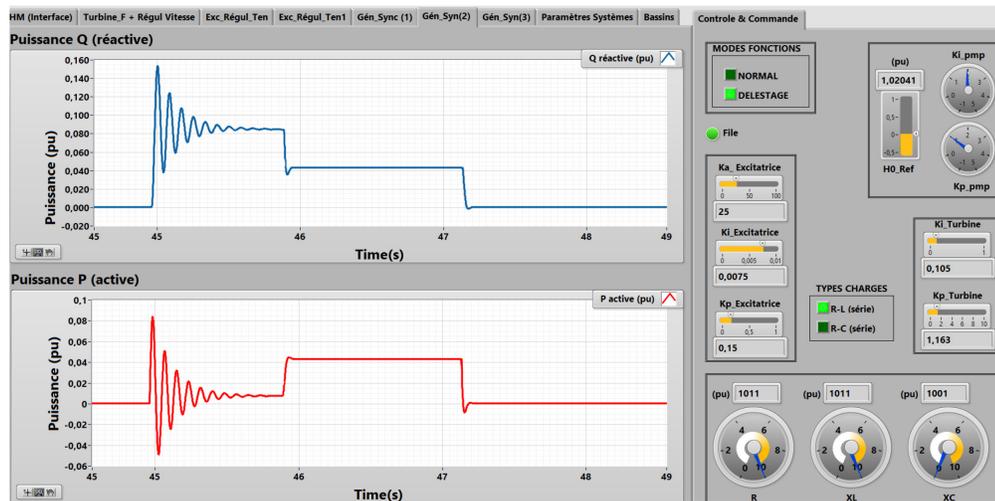


Figure 5-6 : puissance active et réactive lors de la commutation d'une charge RL-série

Au premier enclenchement, on observe sur les puissances des transitoires importants de l'interaction entre la GS qui est globalement capacitive et l'inductance X_L . Ces oscillations sont très vite éliminées par l'action du régulateur de tension. L'opérateur peut agir sur les gains du correcteur PI pour ajuster ces transitoires. Observons aussi que l'action d'enclencher une charge essentiellement inductive n'a aucun impact sur le couple mécanique. Le Tableau 5-1 illustre les données de simulations de ce scénario, nous pouvons entre autres observer les différentes valeurs du facteur de puissance lors des différents enclenchement/déclenchement.

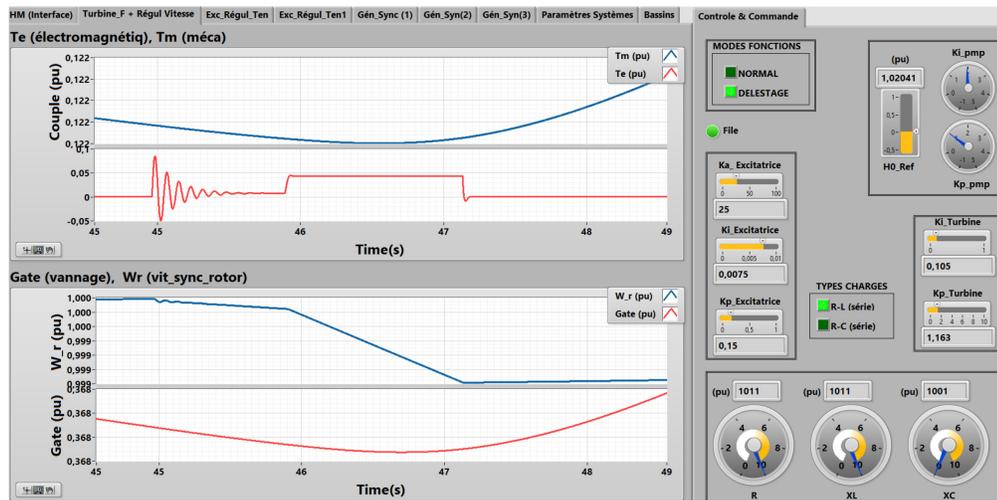


Figure 5-7 : Couple, Vitesse de rotation et vannage lors de la commutation d'une charge RL-série

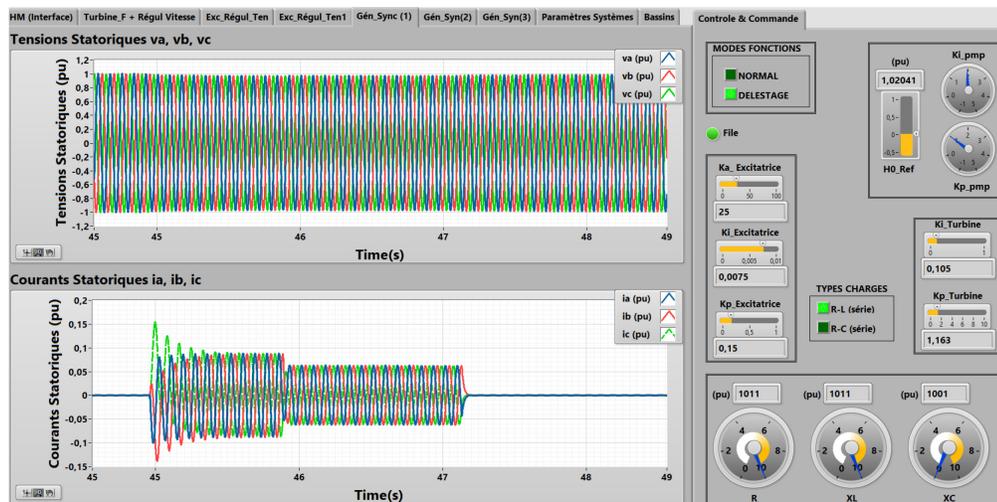


Figure 5-8 : Tensions et Courants Statoriques lors de la commutation d'une charge RL-série

Les courants statoriques (Figure 5-8) augmentent brusquement tandis que les tensions statoriques sont maintenues à 1 pu par le régulateur de tension. À l'enclenchement de la partie résistive, les transitoires de puissance sont moins importants à cause de l'effet dissipateur de cette dernière. On observe aussi une diminution des courants i_{abc} car l'impédance de la charge augmente. Suite à cette

augmentation de la puissance active produite, le couple T_m (ainsi que le vannage) sont ajustés pour maintenir la vitesse de rotation à 1 pu. Par ailleurs, on observe une tendance instantanée à la perte de vitesse dans le système, puisque le vannage ne réagit avec un certain retard. De plus, les constantes de temps mécaniques sont en général plus grandes que les constantes de temps électriques.

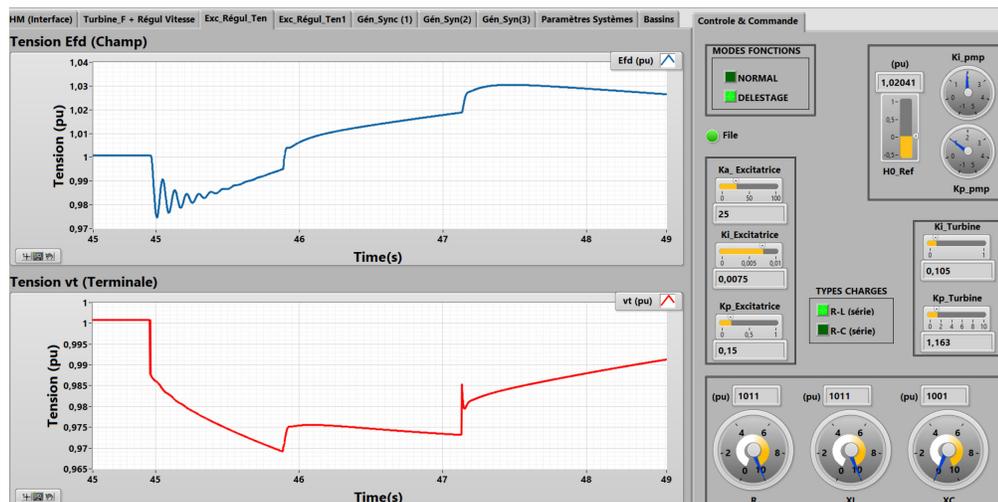


Figure 5-9 : tension (champ et terminal) lors de la commutation d'une charge RL-série

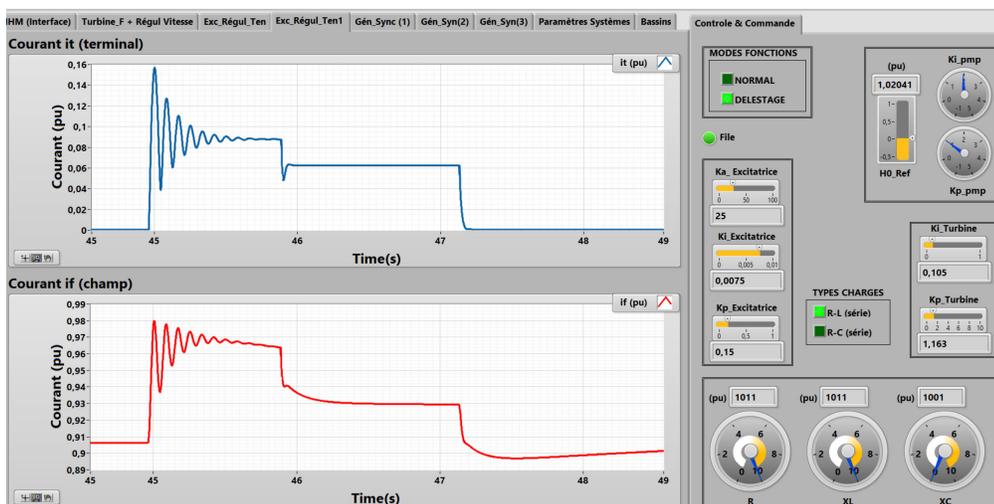


Figure 5-10 : Courant (champ et terminal) lors de la commutation d'une charge RL-série

5.3.2 Commutation de charges importantes ($R=X_L=1$ pu)

Dans ce scénario, Nous partons d'un fonctionnement nominal avec une charge $R = X_L = 1$ pu . De manière analogue au scénario précédent, à l'instant $t = 413.65$ s , on fait monter la partie réactive à 10 pu, puis à l'instant $t = 415.1$ s on enclenche une autre charge $R = 10$ pu .

Tableau 5-2 : Données de simulations Charges RL ($R = X_L = 1$ pu à l'état initial)

Simulation	Impédance résistive (pu)	Impédance Inductive (pu)	$\text{Cos } \varphi$	Puissance active (pu)	Puissance réactive (pu)
A vide	1	1	0,7	0,405	0,395
Enclenchement	1	11	0,09	0	0,1
Enclenchement	11	11	0,99	0,05	0,05

Les résultats obtenus sur l'IHM sont donnés par les captures d'écran de la Figure 5-11 à la Figure 5-14.

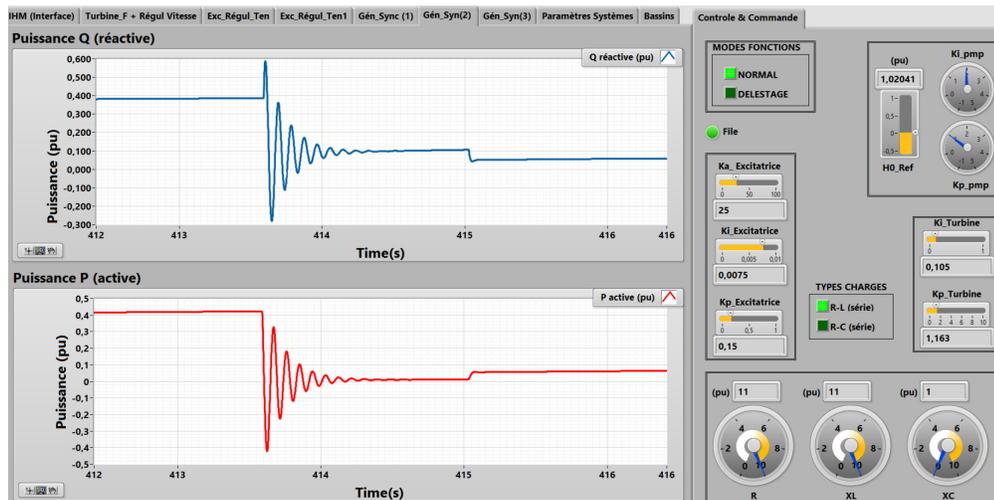


Figure 5-11 : puissance active et réactive pour la commutation de charges importantes

Lors de l'enclenchement de la première charge X_L , on remarque une augmentation brusque de la tension de champ E_{fd} avec un large dépassement. Ceci montre une très bonne réaction du régulateur de tension qui réussit à maintenir la tension terminale proche de 1 pu (voir Figure 5-12). En même temps, la puissance réactive produite augmente compte tenu de l'importance de la charge réactive ajoutée, et la puissance active diminue compte tenu de la diminution du courant terminal observable sur la Figure 5-14.

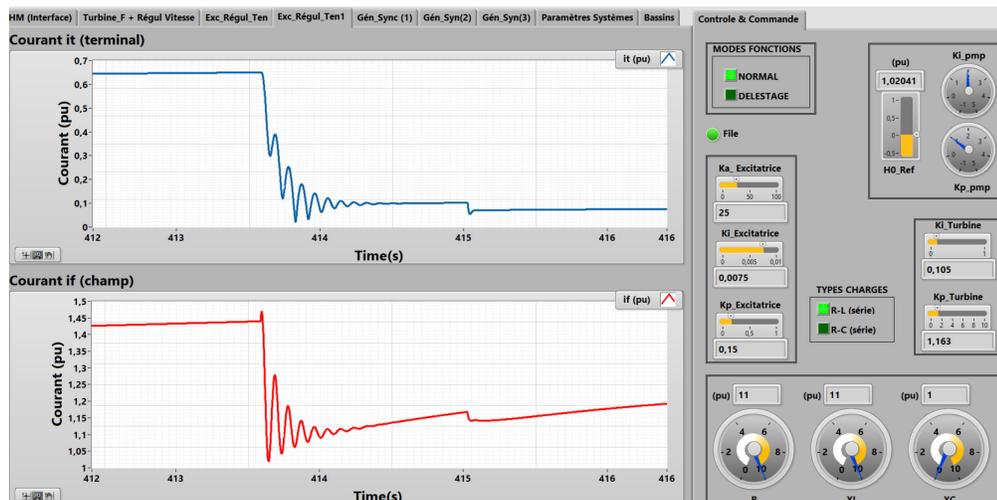


Figure 5-12 : Courant (champ et terminal) pour la commutation de charges importantes

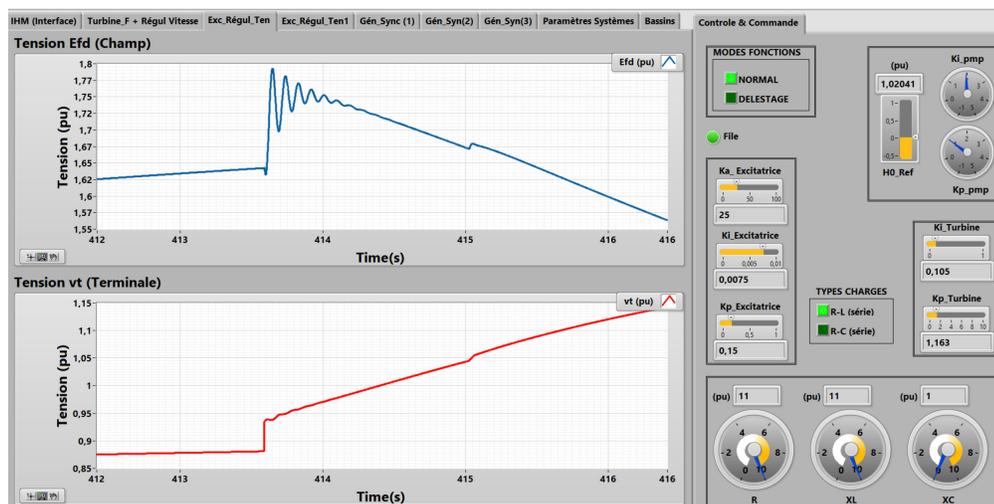


Figure 5-13 : tension (champ et terminal) pour la commutation de charges importantes

Le fait de commuter la partie réactive de la charge a un impact prépondérant sur la tension terminale qui subit un transitoire observable, mais très vite éliminé par la régulation de tension. Ces transitoires peuvent être analysés en temps réel par l'opérateur via l'IHM construit.

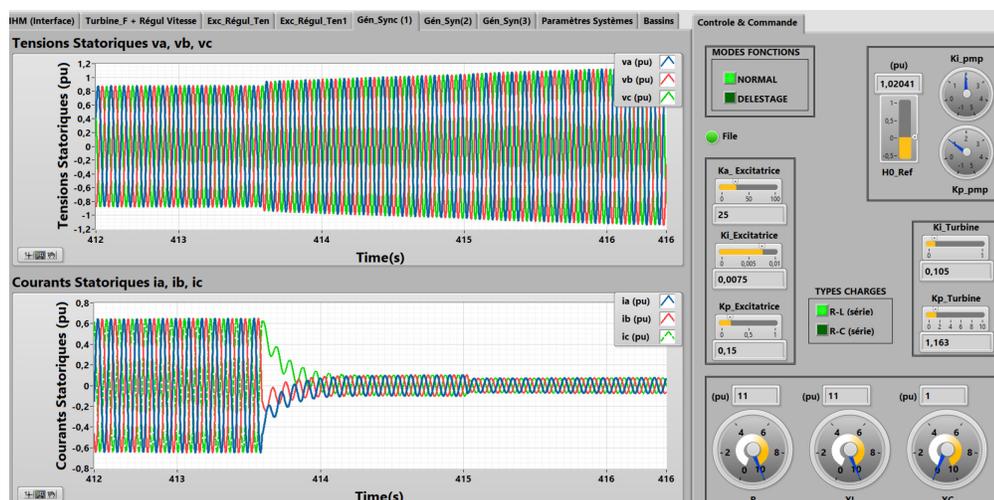


Figure 5-14 : Tensions et courants statoriques pour la commutation de charges importantes

5.4 Scénario pour une variation brusque de la référence de niveau dans le bassin

Dans ce scénario on fait une augmentation brusque de la référence du niveau d'eau dans le bassin supérieur de 1pu à 1,25 pu, l'opération s'effectue environ à l'instant $t = 63,5s$.

Une augmentation brusque du débit d'eau dans la pompe de recirculation qui atteint un dépassement de 0,47pu par rapport à sa position initiale. La pompe fait donc remonter de l'eau dans le bassin supérieur afin de répondre à la perturbation provoquée par la nouvelle référence demandée. Au niveau du bassin supérieur une atteinte de la nouvelle position de référence s'effectue à $t = 83,5s$, mais on observe un dépassement de 0,32 pu avant son régime permanent, le système a un temps de réponse d'environ 20s, le niveau d'eau dans la chambre d'équilibre subi aussi des dépassements et oscillations avant d'atteindre sa position d'équilibre.



Figure 5-15 : variation brusque de la référence du niveau d'eau

De plus de petites variations sont observées pour le débit dans la turbine lors de la période transitoire de la perturbation.

5.5 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté la construction de notre système de supervision du simulateur analogique de centrale (SACH). Il est entièrement développé dans l'environnement de développement graphique LabVIEW dont les principes de bases ont été présentés. L'IHM est constituée d'une logique programmée en langage graphique et d'une face avant comportant tous les instruments de visualisations et les leviers de commandes de l'opérateur. La conception est flexible grâce à l'application de la communication réseau via l'exploitation de piles TCP/IP pour la mise en réseau des commandes et des mesures. Un synoptique d'implémentation du système de supervision du SACH en cours de construction a été proposé.

Les fonctions de l'IHM construit ont été testées au travers de quelques scénarios de fonctionnement en temps-réel permettant d'observer, et d'ajuster de manière dynamique les transitoires du système. À cet effet, l'IHM a été connecté au modèle Simulink complet du SACH présenté à l'**Annexe 16**. Ceci s'est fait juste par une configuration des adresses IP de l'ordinateur hôte du modèle Simulink et de l'ordinateur exécutant l'IHM. Une fois la construction du SACH terminé, cette interface pourra être exploitée en configurant l'adresse IP de l'automate sur site concentrant toutes les mesures et les actions.

Chapitre 6: CONCLUSION GÉNÉRALE

6.1 Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons exposé un ensemble de travaux effectués dans l'objectif ultime de réaliser l'automatisation du simulateur analogique (SACH). Tel qu'indiqué dans la démarche méthodologique, nous nous sommes appuyés sur des modèles numériques du système pour bâtir les automatismes de régulation. Dans le présent chapitre de conclusion, nous présentons les principaux résultats de recherche et les perspectives d'amélioration que nous entrevoyons.

6.2 Travaux exécutés

Les travaux présentés dans cette thèse incluent :

- une revue de la littérature sur les centrales hydrauliques et leurs différentes composantes ;
- une revue sur les outils et les concepts de commande applicables à la présente problématique ;
- L'analyse, la modélisation de chaque composante du système, l'implantation et la vérification d'un modèle complet du SACH dans l'environnement Matlab/Simulink ;
- le développement et la présentation de l'IDE LabVIEW pour construire l'IHM exploitant une architecture d'échange de données ;
- la vérification de l'interface d'opération déportée en interaction avec le modèle Simulink, via un réseau local.

6.3 Principaux résultats

Les principaux résultats du système de commande de la microcentrale ont été exposés dans les précédents chapitres et des compléments sont donnés en annexes.

Il a été observé que l'interface développée a permis de tester plusieurs scénarios de fonctionnement de la microcentrale et de la génératrice. Les courbes produites correspondent au fonctionnement de systèmes similaires décrits dans la littérature technique consultée. Ainsi, les leviers nécessaires à la configuration, incluant les paramètres des différents régulateurs, et à l'actionnement du système, enclenchement et délestage de charge ont été vérifiés. La visualisation des principales variables de production permettant la supervision du SACH ont été présentés. Entre autres une simulation de la dynamique du système de recirculation d'eau dans le bassin de retenue a été faite. Celle-ci est à la base du fonctionnement de la conduite forcée et de la production de puissance.

6.4 Travaux futurs proposés

Pour les travaux futurs nous proposons dans un premier temps de remplacer (en partie ou en totalité) les modèles Simulink par de véritables cartes d'acquisitions ou automates produisant des signaux réels provenant de la microcentrale réelle. Ainsi, l'IHM conçu pourra être relié aux différents capteurs et actionneurs du système réel et des analyses de la dynamique du système réel pourront être effectuées. En particulier, les modèles hydrauliques et mécaniques, sont fortement idéalisés dans la présente étude notamment en admettant l'incompressibilité de l'eau ou la rigidité de la conduite forcée. Ces modèles pourront être remplacés par un système réel.

ANNEXES

Annexe 1 : Équations fondamentales de machine synchrone

– Équations des tensions (en pu)

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_d}{dt} = r_a i_d + \omega_m \psi_q + v_d \quad (\text{A. 1})$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_q}{dt} = r_a i_q - \omega_m \psi_d + v_q \quad (\text{A. 2})$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_o}{dt} = r_a i_o + v_o \quad (\text{A. 3})$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_f}{dt} = -r_f i_f + v_f \quad (\text{A. 4})$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_D}{dt} = -r_D i_D \quad (\text{A. 5})$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{1Q}}{dt} = -r_{1Q} i_{1Q} \quad (\text{A. 6})$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{2Q}}{dt} = -r_{2Q} i_{2Q} \quad (\text{A. 7})$$

– Équations des flux (en pu)

$$\psi_d = -(x_a + x_{md}) i_d + x_{md} i_f + x_{md} i_D \quad (\text{A. 8})$$

$$\psi_q = -(x_a + x_{mq}) i_q + x_{mq} i_{1Q} + x_{mq} i_{2Q} \quad (\text{A. 9})$$

$$\psi_o = -x_o i_o \quad (\text{A. 10})$$

$$\psi_f = x_{ff} i_f + x_{fD} i_D - x_{md} i_d \quad (\text{A. 11})$$

$$\psi_D = x_{fD} i_f + x_{DD} i_D - x_{md} i_d \quad (\text{A. 12})$$

$$\psi_{1Q} = x_{1QQ} i_{1Q} + x_{mq} i_{2Q} - x_{mq} i_q \quad (\text{A. 13})$$

$$\psi_{2Q} = x_{mq} i_{1Q} + x_{2QQ} i_{2Q} - x_{mq} i_q \quad (\text{A. 14})$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e t) & \cos\left(\theta_e t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_e t) & -\sin\left(\theta_e t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{A. 15})$$

$$\Leftrightarrow V_{dgo} = [P] V_{abc}$$

Annexe 2 : Formules de calcul des grandeurs de bases de la génératrice synchrone

Grandeur	Unité	Stator	Champ	Amortisseur D	Amortisseurs nH
Tension	[V]	$V_{sb} = \sqrt{2}V_{IN}$	$V_{fb} = S_b / I_{fb}$	$V_{Db} = S_b / I_{Db}$	$V_{Qb} = S_b / I_{Qb}$
Courant	[A]	$I_{sb} = \sqrt{2}V_{IN}$	I_{fb}	$I_{Db} = (L_{md} / L_{dD}) I_{sb}$	$I_{Qb} = (L_{mq} / L_{qQ}) I_{sb}$
Puissance	[VA], [W], [VAR]	$S_b = 3/2 V_{sb} I_{sb}$			
Impédance	[Ω]	$Z_{sb} = V_{sb} / I_{sb}$	$Z_{fb} = V_{fb} / I_{fb}$	$Z_{Db} = V_{Db} / I_{Db}$	$Z_{Qb} = V_{Qb} / I_{Qb}$
Inductance	[H]	$L_{sb} = Z_{sb} / \omega_b$	$L_{fb} = Z_{fb} / \omega_b$	$L_{Db} = Z_{Db} / \omega_b$	$L_{Qb} = Z_{Qb} / \omega_b$
Flux	[wb]	$\psi_{sb} = V_{sb} / \omega_b$ $= L_{sb} I_{sb}$	$\psi_{fb} = L_{fb} I_{fb}$	$\psi_{Db} = L_{Db} I_{Db}$	$\psi_{Qb} = L_{Qb} I_{Qb}$
Pulsation	[s ⁻¹]	$\omega_b = 2\pi f_N$			
Vitesse	[ms ⁻¹]	$\omega_{mb} = \omega_b / n_p$			
Couple	[Nm]	$T_b = S_b / \omega_{mb} = (3/2) n_p \psi_{sb} I_{sb}$			

Annexe 3 : Paramètres de validation du modèle de régulation de vitesse

Turbine + Chambre d'équilibre		
Paramètres Turbine-Régulateur	$T_{W_{ca}}$	9,15
	$T_{W_{cf}}$	0,82
	C_{ce}	170,7
	$f_{p_{ca}}$	0,05
	$f_{p_{cf}}$	0,01
	$f_{p_{ce}}$	0
	A_t	1,67
	U_{NL}	0,13
	D_w	0,01

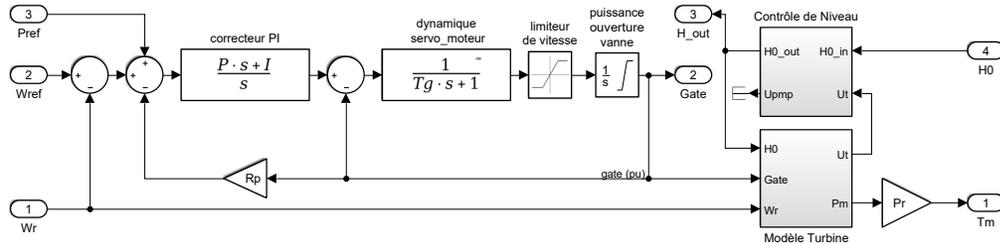
Annexe 4 : Paramètres Électriques de la génératrice synchrone

Paramètres de la génératrice synchrone (GS)		
Paramètres Électriques	Puissance apparente S	100 MVA
	Tension Nominale	13,8 KV
	x'_d	0,220
	x_d	1,180
	x''_q	0,145
	x'_q	0,380
	x_q	1,050
	r_a	0,0035
	x_l ou x_p	0,075
	T''_{d0}	0,0277
	T'_{d0}	1,100
	T''_{q0}	0,0351
	T'_{q0}	0,1086

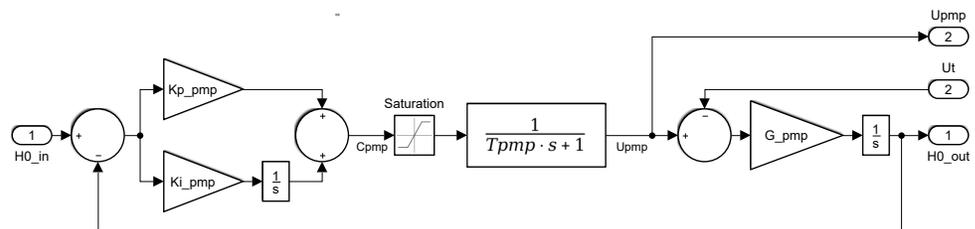
Annexe 5 : Paramètres de validation du modèle du régulateur de Tension

Régulateur de tension Statique		
Paramètres Régulateur de Tension	T_R	0,0001
	K_R	1
	T_A	0,200
	K_A	25
	T_1	0,001
	T_F	2
	K_F	10
	z_i	0.001
	R_d	0.001
	K_p	0.001
	K_i	0,001

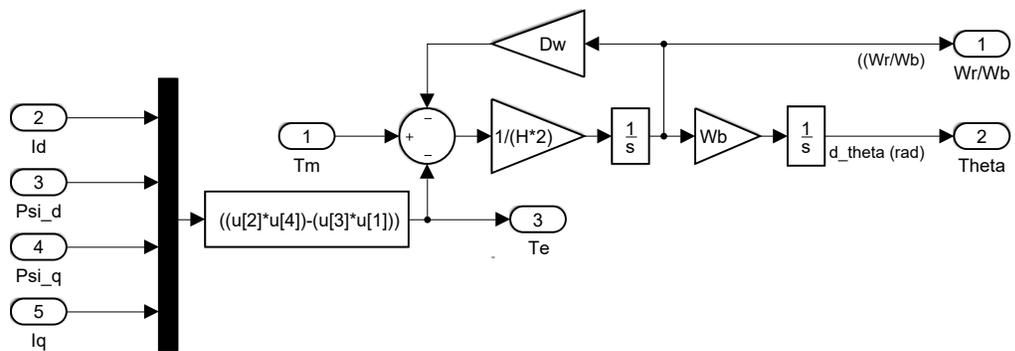
Annexe 8 : modèle éclaté complet turbine + régulateur vitesse



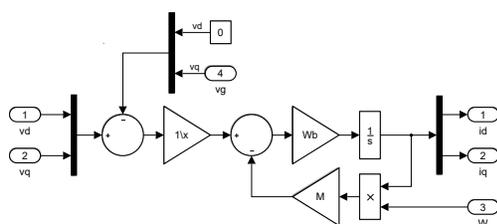
Annexe 9 : modèle du Contrôle de niveau



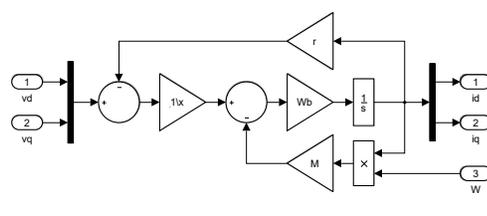
Annexe 10 : modèle mécanique de la génératrice synchrone



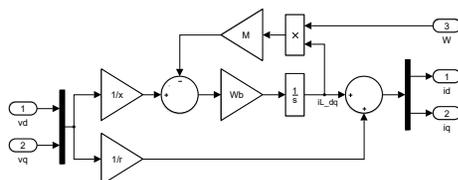
Annexe 13 : Modèles Simulink des charges électriques applicables au SACH



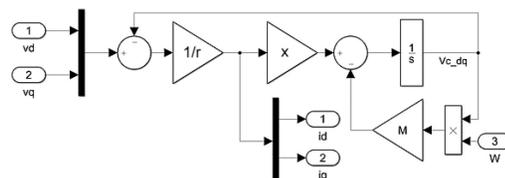
(a) Bus infini



(b) Charge RL série

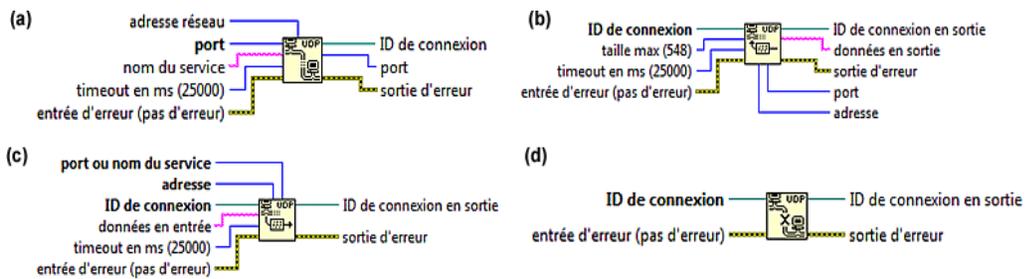


(c) Charge RL parallèle

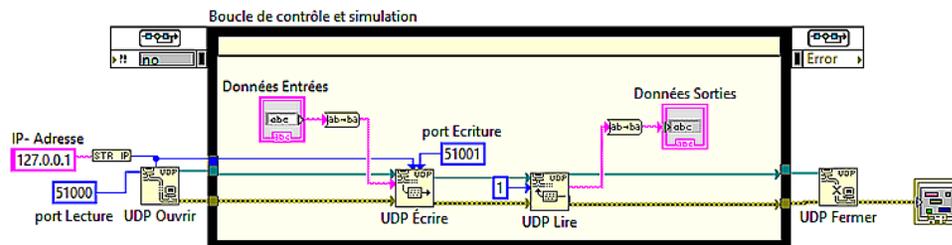


(d) Charges RC série

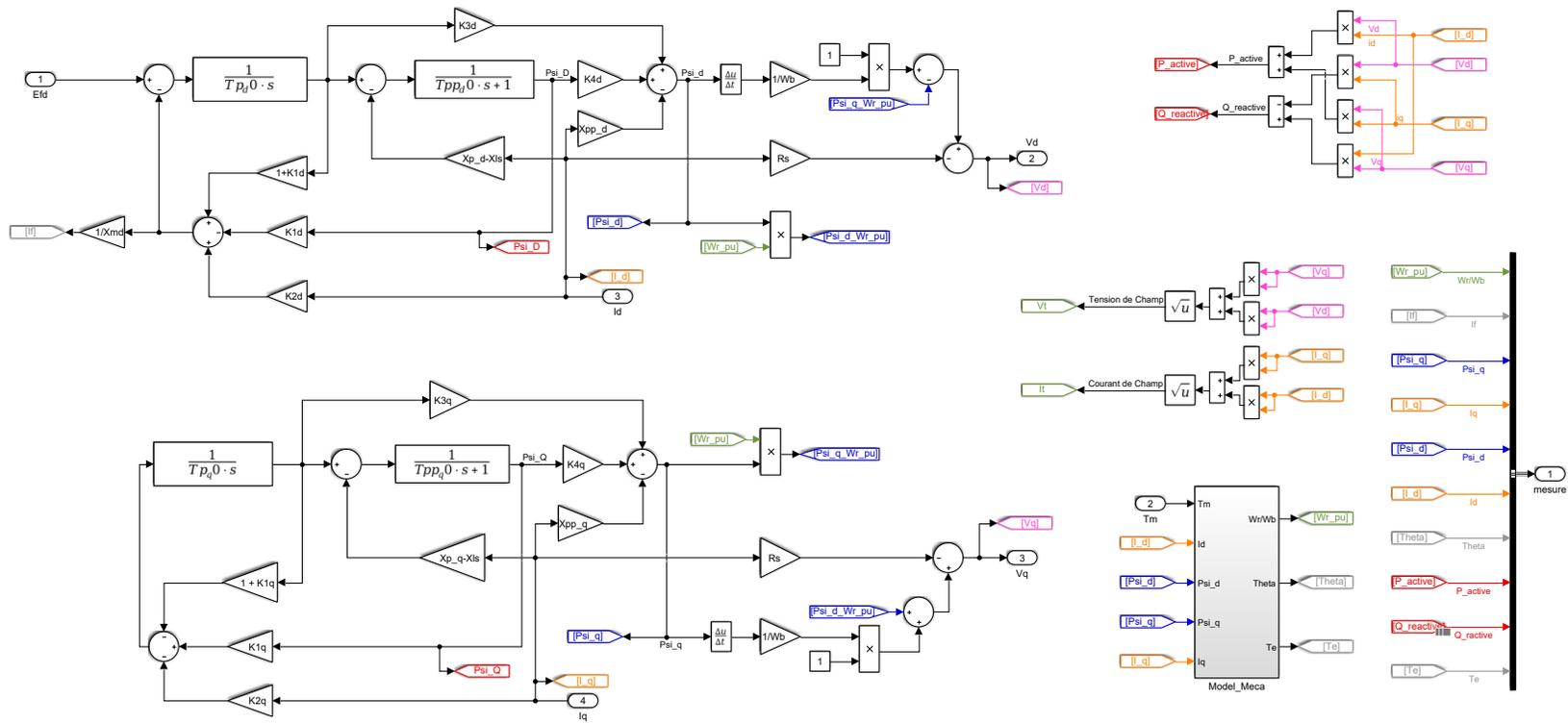
Annexe 14 : (a) ouverture connexion ; (b) lecture UDP (c) écriture UDP (d) fermeture connexion



Annexe 15 : modèle de communication UDP de notre IHM sur LabVIEW



Annexe 17 : modèle complet génératrice synchrone (électrique + mécanique)



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. Xiang and C. Lawley, “The impact of british columbia’s carbon tax on residential natural gas consumption,” *Energy Economics*, vol. 80, pp. 206–218, 2019.
- [2] B. Charles, “Système de tarification du carbone au canada,” Master’s thesis, Université de Sherbrooke, 2014.
- [3] S. Balibar, “Energy transitions after cop21 and 22,” *Comptes Rendus Physique*, vol. 18, no. 7-8, pp. 479–487, 2017.
- [4] P. Tirado-Seco and G. Martineau, *Rapport Technique: Comparaison Des Filières de Production D’électricité Et Des Bouquets D’énergie Électrique*. Bureau de la recherche et centre de développement technologique (BRCDT) école polytechnique de Montréal, 2014.
- [5] B. L. Cohen, “Breeder reactors: A renewable energy source,” *Am. J. Phys.*, vol. 51, no. 1, p. 78, 1983.
- [6] “Canadian electricity - exports and imports,” Canadian National Energy Board, Tech. Rep., 2003.
- [7] *International Energy Outlook*, no. 2017, U.S. Energy Information Administration, September 2017. [Online]. Available: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)
- [8] J. M. Williams, J. L. Cale, N. D. Benavides, J. D. Wooldridge, A. C. Koenig, J. L. Tichenor, and S. D. Pekarek, “Versatile hardware and software tools for educating students in power electronics,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 47, no. 4, pp. 436–445, 2004.
- [9] M. Kezunovic, A. Abur, G. Huang, A. Bose, and K. Tomsovic, “The role of digital modeling and simulation in power engineering education,” *IEEE transactions on power systems*, vol. 19, no. 1, pp. 64–72, 2004.
- [10] M. Dawande, V. Donescu, Z. Yao, and V. Rajagopalan, “Recent advances in simulation of power electronics converter systems,” *Sadhana*, vol. 22, no. 6, pp. 689–704, 1997.
- [11] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-hill New York, 1994, vol. 7.

- [12] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power system control and stability*. John Wiley & Sons, 2008.
- [13] The IEEE Standards Board, *Test Procedures for Synchronous Machines*, The IEEE Power Engineering Society Std. 115, Rev. R2002, 2002.
- [14] The IEEE-SA Standards Board, *Ieee recommended practice for excitation system models for power system stability studies (ieee std 421.5-2016)*, IEEE-PES Std. 421-5, August 2016.
- [15] M. Vinatoru, “Monitoring and control of hydro power plant,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 40, no. 8, pp. 44–55, 2007.
- [16] P. Demetriou, M. Asprou, J. Quiros-Tortos, and E. Kyriakides, “Dynamic iee test systems for transient analysis,” *IEEE Systems Journal*, vol. 11, no. 4, pp. 2108–2117, 2015.
- [17] J. Tsofie and R. Wamkeue, “Advanced-model of synchronous generator for hydropower plants numerical simulations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 663–670, 2016.
- [18] I. Moreno-Garcia, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, M. Gonzalez-Redondo, E. J. Palacios-Garcia, and C. D. Moreno-Moreno, “Development and application of a smart grid test bench,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 162, pp. 45–60, 2017.
- [19] P. C. Kotsampopoulos, V. A. Kleftakis, and N. D. Hatziargyriou, “Laboratory education of modern power systems using phil simulation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 3992–4001, 2016.
- [20] E. Lunca, S. Ursache, and O. Neacsu, “Graphical programming tools for electrical engineering higher education.” *Int. J. Online Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 19–24, 2011.
- [21] G. Dume, “Synchronous generator model based on labview software,” *WSEAS Transactions on Advances in Engineering Education*, vol. 10, no. 2, pp. 101–112, 2013.
- [22] S. Tammaruckwattana, S. Reangkittakarn, P. Khajornrungruang, P. Phaisalpanumas, and A. Rerkratn, “Hydropower plant generator system model using labview,” in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [23] Y. L. Karnavas and E. I. Lygouras, “Synchronous machine analysis and modelling in labview: An educational tool for transient stability studies,”

International Journal of Electrical Engineering Education, p. 0020720918791422, 2018.

- [24] T. Tašner, D. Lovrec, F. Tašner, and J. Edler, “Comparison of labview and matlab for scientific research.” *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*, vol. 10, no. 3, 2012.
- [25] M. F. ANCTILM and M. C. DRAGHICI, “Conception et réalisation d’un groupe turbine alternateur : Ordonnancement des données techniques,” Université du Québec en Abitibi Témiscamingue (UQAT), Tech. Rep., 2004.
- [26] M. A. Khalf, “Conception optimale d’un alternateur de faible puissance pour le simulateur de groupe turbine-alternateur d’hydro-québec,” Master’s thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [27] X. Xuejun, X. Ping, Y. Sheng, and L. Ping, “Real-time digital simulation of control system with labview simulation interface toolkit,” in *2007 Chinese Control Conference*. IEEE, 2007, pp. 318–322.
- [28] G. Dume, “Synchronous generator model based on labview software,” *WSEAS Transactions on Advances in Engineering Education*, vol. 10, no. 2, pp. 101–112, 2013.
- [29] V. K. Singh and S. Singal, “Operation of hydro power plants-a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 610–619, 2017.
- [30] C. Jawahar and P. A. Michael, “A review on turbines for micro hydro power plant,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 882–887, 2017.
- [31] H. Fang, L. Chen, N. Dlakavu, and Z. Shen, “Basic modeling and simulation tool for analysis of hydraulic transients in hydroelectric power plants,” *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 23, no. 3, pp. 834–841, 2008.
- [32] R. Naghizadeh, S. Jazebi, and B. Vahidi, “Modeling hydro power plants and tuning hydro governors as an educational guideline,” *International Review on modelling and simulations*, vol. 5, no. 4, pp. 1780–1790, 2012.
- [33] R. E. Cosse, M. D. Alford, M. Hajiaghajani, and E. R. Hamilton, “Turbine/generator governor droop/isochronous fundamentals-a graphical approach,” in *2011 Record of Conference Papers Industry Applications Society 58th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)*. IEEE, 2011, pp. 1–8.

- [34] G. Ardizzon, G. Cavazzini, and G. Pavesi, “A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 746–761, 2014.
- [35] I. W. Group *et al.*, “Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 167–179, 1992.
- [36] C. Zhang, M. Yang, and J. Li, “Detailed modelling and parameters optimisation analysis on governing system of hydro-turbine generator unit,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 5, pp. 1045–1051, 2017.
- [37] S. H. Y. G. Isobe, “Stability of a hydraulic turbine generating unit controlled by p.i.d. governor.”
- [38] V. Koritarov, L. Guzowski, J. Feltes, Y. Kazachkov, B. Lam, C. Grande-Moran, G. Thomann, L. Eng, B. Trouille, and P. Donalek, “Review of existing hydroelectric turbine-governor simulation models,” *Argonne National Laboratory, Technical Report ANL/DIS-13/05*, 2013.
- [39] B. Strah, O. Kuljaca, and Z. Vukic, “Speed and active power control of hydro turbine unit,” *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 424–434, 2005.
- [40] H. Quinot, H. Bourles, and T. Margotin, “Robust coordinated avr+ pss for damping large scale power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1446–1451, 1999.
- [41] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power system dynamics and stability*. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 1998, vol. 101.
- [42] A. Barakat, S. Tnani, G. Champenois, and E. Mouni, “Analysis of synchronous machine modeling for simulation and industrial applications,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, no. 9, pp. 1382–1396, 2010.
- [43] T. A. T. Tameghe, “Modélisation et simulation d’un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale,” Master’s thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2012.
- [44] Y. Pannatier, “Optimisation des stratégies de réglage d’une installation de pompage-turbinage à vitesse variable,” EPFL, Tech. Rep., 2010.
- [45] D. R. Gordon Clarke, *Practical Modern SCADA Protocols: DNP3, 60870.5 and Related Systems*.

- [46] F. Y. Zainal and N. Abd Rahim, "Implementation of iec 60870-5-101 protocol on condition monitoring of water pump system," *IET Seminar Digest*, vol. 2014, 01 2014.
- [47] E. Levi, "Saturation modelling in d-q axis models of salient pole synchronous machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 1, pp. 44–50, March 1999.
- [48] D. Babunski and A. Tuneski, "Modelling and design of hydraulic turbine-governor system," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 36, no. 7, pp. 263–267, 2003.
- [49] R. Nanaware, S. Sawant, and B. Jadhav, "Modeling of hydraulic turbine and governor for dynamic studies of hpp," in *IJCA Proceedings on International Conference on Recent Trends in Information Technology and Computer Science*, 2012, pp. 6–11.
- [50] A. Siemens, "Power generation (2003), thyristor excitation system [manual]."
- [51] Q. Xu, Y. Shao, Q. Huo, and S. Zhao, "Design of static self shunt excitation system for giant hydro generator," in *2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*. IEEE, 2013, pp. 416–419.
- [52] M. Singock and T. Alphonse, "Conception et caractérisation numérique d'une pompe à turbine verticale de grande capacité." Master's thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2018.
- [53] Y. L. Karnavas and E. I. Lygouras, "Synchronous machine analysis and modelling in labview: An educational tool for transient stability studies," *International Journal of Electrical Engineering Education*, p. 0020720918791422, 2018.
- [54] Y. Lu, S. Papagiannidis, and E. Alamanos, "Internet of things_ a systematic review of the business literature from the user and organisational perspectives."
- [55] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, and T. Watson, "The industrial internet of things (iiot)_ an analysis framework."
- [56] B.-J. Youm and J. Park, "Tcp/ip protocol over ieee-1394 network for real-time control applications."
- [57] A. King and R. Hunt, "Protocols and architecture for managing tcp/ip network infrastructures," *Computer Communications*, vol. 23, no. 16, pp. 1558–1572, 2000.