Table de matière

Résumé i

Abstract ii

Remerciements iii

Table de matière iv

Liste des figures ix

Liste des tableaux xiii

Liste des symboles xiv

CHAPITRE 1 Introduction générale 1

1.1 Contexte socio-économique 1

1.2 Contexte socio-éducatif 5

1.3 Intérêts du simulateur numérique 5

1.4 Objectifs spécifiques, méthodologie et organisation du document 6

1.5 Conclusion 10

CHAPITRE 2 Présentation du simulateur analogique, similarités avec les centrales hydroélectriques réelles 11

2.1 Production de l'énergie hydroélectrique 11

2.1.1 Structure d'une centrale hydraulique 11

2.1.2 Les types de turbine 13

2.1.2.1 La turbine Kaplan 13

2.1.2.2 La turbine Pelton 14

2.1.2.3 La turbine Francis. 15

2.2 Processus de conception du simulateur analogique 16

2.3 Différentes parties et rôle des éléments du simulateur analogique 18
2.3.1 Le circuit hydraulique 20
2.3.1.1 Les réservoirs 21
2.3.1.2 Les conduites 22
2.3.1.3 La bâche spirale 23
2.3.1.4 La roue et l'aspirateur 24
2.3.2 Le circuit électrique 25
2.3.3 Le circuit de contrôle 26
2.3.3.1 L'excitatrice et son régulateur de tension 27
2.3.3.2 Le régulateur de vitesse 28
2.4 Fonctionnement du simulateur 30
2.5 Conclusion 31
CHAPITRE 3 Les simulateurs numériques des centrales hydroélectriques 32
3.1 Les modèles dynamiques 32
3.2 Hypothèses de modélisations 35
3.2.1 Propriétés des fluides 35
3.2.1.1 La compressibilité 35
3.2.1.2 La viscosité 35
3.2.2 Éléments caractéristiques de la conduite forcée 37
3.2.2.1 Constante de temps de l'eau 37
3.2.2.2 Les pertes de charge dans une conduite forcée 37
3.2.2.3 Constante d'élasticité de la conduite forcée 38
3.2.2.4 Impédance de la conduite forcée 38
3.2.3 Les éléments caractéristiques d'une chambre d'équilibre 39
3.2.3.1 La période naturelle de la chambre d'équilibre 39
3.2.3.2 Constante de stockage de la chambre d'équilibre 39

3.3 Conclusion 40

CHAPITRE 4 Modélisation des différents sous-ensembles 41

4.1 Modélisation du circuit hydraulique 41

4.1.1 Modélisation de la conduite forcée 48

4.1.2 Modélisation de la turbine 62

4.1.2.1 Les différents modèles de la turbine Francis 63

4.2 Modélisation du circuit électrique 85

4.2.1 Modèle de la génératrice synchrone 85

4.2.1.1 Modèle de la génératrice sans charge 87

4.2.1.2 Modèle de la charge 97

4.2.1.3 Représentation de la génératrice et de la charge 102

4.2.1.4 Prise en compte de la saturation 106

4.2.1.5 Simulation du modèle de la génératrice et de la charge 111

4.3 Modélisation du circuit de contrôle 118

4.3.1 Modèle de l'excitatrice 118

4.3.1.1 Présentation du système d'excitation 119

4.3.1.2 Détermination des paramètres de la génératrice 126

i) Détermination des paramètres de simulation 126

ii) Simulation 128

ii) Détermination de la fonction de transfert liant la tension de champ v_f et la tension d'armature de la génératrice v_t 130

4.3.2 Modélisation du régulateur de vitesse 139

4.3.2.1 Modèle du régulateur 141

i) Développement du modèle d'état du régulateur mécanique 144

ii) Développement du modèle d'état du régulateur PID 147

4.4 Conclusion 157

CHAPITRE 5 Mise en commun des différents sous-ENSEMBLES : Modèle final 158

5.1 Structure finale du simulateur numérique 158

5.2 Données de simulation 160

5.2.1 Le circuit hydraulique 160

5.2.2 La génératrice et la charge 164

5.2.3 Le circuit de contrôle 165

5.3 Mode opératoire et attentes 166

5.3.1 Mode opératoire 166

5.3.2 Les attentes 166

5.3.3 Simulation 169

5.4 Conclusion 184

CHAPITRE 6 Conclusion Générale 185

REFERENCES 187

ANNEXES 192

Annexe 1 192

Annexe 2 193

Annexe 3 195

Annexe 4 196

Annexe 5 197

Annexe 6 198

Annexe 7 200

Annexe 8 202

Annexe 9 203

Annexe 10 205

Annexe 11 207

Annexe 12 211

Liste des figures

Figure 1-1 : Production énergétique en Amérique du Nord, au Canada et au Québec en 2007 2
Figure 1-2 : Prévision de consommation énergétique entre 2005 et 2020 3
Figure 1-3 : Émission des gaz à effet de serre des différentes sources énergétiques 4
Figure 1-4 : Objectif général du thème 7
Figure 1-5 : Démarche à suivre 8
Figure 1-6 : Organigramme de modélisation 9
Figure 2-1 : Structure d'une centrale hydroélectrique 12
Figure 2-2 : Illustration d'une turbine hydraulique du type Kaplan 14
Figure 2-3 : Illustration d'une turbine hydraulique du type Pelton 14
Figure 2-4 : Illustration d'une turbine Francis 15
Figure 2-5 : Simulateur analogique 18
Figure 2-6 : Les trois sous-ensembles du simulateur 19
Figure 2-7 : Relation entre les différentes parties du simulateur 20
Figure 2-8 : Bâche spirale 23
Figure 2-9 : Roue dans la bâche spirale 24
Figure 2-10 : Groupe turbo-alternateur 26
Figure 2-11 : Circuit de contrôle 27
Figure 2-12 : Diagramme fonctionnel du circuit d'excitation 28
Figure 2-13 : Transmission des signaux du dispositif de vannage 29
Figure 2-14 : Diagramme fonctionnel du régulateur de vitesse 29
Figure 2-15 : Synoptique final du simulateur analogique 30
Figure 4-1 : Circuit hydraulique 42
Figure 4-2 : Analogie de modèle de la conduite forcée 44
Figure 4-3 : Analogie de modèle de la chambre d'équilibre 45
Figure 4-4 : Équivalence prise d'eau et chambre d'équilibre 47
Figure 4-5 : Section de conduite forcée 49

Figure 4-6 : Superposition des résultats des débits à l'entrée et à la sortie de la conduite forcée pour les deux modèles....53
Figure 4-7 : Impact de la prise en compte de la propagation des ondes 54
Figure 4-8 : Résultats de la division du modèle de la conduite en 13 éléments 57
Figure 4-9 : Système de tuyauterie 57
Figure 4-10 : double conduite 58
Figure 4-11 : Débits dans les deux conduites forcées 61
Figure 4-12 : Les différents modèles de la turbine Francis....63
Figure 4-13 : Comportement de la turbine idéale 68
Figure 4-14 : Modèle non linéaire simplifié de la turbine hydraulique 71
Figure 4-15 : Puissance pour une variation de la vanne de 0.1p.u du modèle non linéaire simplifié 73
Figure 4-16 : Modèle non linéaire simplifié de la turbine avec prise en compte des caractéristiques de l'eau et de la conduite 78
Figure 4-17 : Résultats du modèle non linéaire simplifié et celui du simulateur pour une variation de 0.9 à 0.8 pu à l'entrée de la vanne : diminution du débit....80
Figure 4-18 : Résultats du modèle non linéaire simplifié et celui du simulateur pour une variation de 0.8 à 0.9 pu à l'entrée de la vanne : augmentation du débit....82
Figure 4-19 : Influence de la résistance hydraulique sur le modèle de la turbine....84
Figure 4-20 : Présentation de la génératrice synchrone 87
Figure 4-21 : Enroulement du stator et du rotor dans le repère abc....87
Figure 4-22 : Machine synchrone dans les axes dq....91
Figure 4-23 : Circuits électriques équivalents de la machine synchrone triphasée dans les axes de Park en mode génératrice....92
Figure 4-24 : Charge locale....97
Figure 4-25 : Génératrice connectée à un bus infini 98
Figure 4-26 : Diagramme des phaseurs de la génératrice en régime permanent 109
Figure 4-27 : Structure des opérations réalisées pendant l'essai....112
Figure 4-28 : Structure de la charge....113

Rapport-Gratuit.com

Figure 4-29 : Résultats de simulation de la génératrice 115
Figure 4-30 : Conformité des résultats du modèle de la génératrice..... 117
Figure 4-31 : Influence de la saturation sur la tension d'armature 117
Figure 4-32 : Système d'excitation Brushless..... 119
Figure 4-33 : Modèle en fonction de transfert du système d'excitation Bruhsless..... 122
Figure 4-34 : Simplification de la figure 4-28 125
Figure 4-35 : Tension dans le repère abc (fonctionnement à vide de la génératrice) 129
Figure 4-36 : Courant de court-circuit de la génératrice 129
Figure 4-37 : Réponse indicielle de la génératrice v_t pour v_f=1p.u 131
Figure 4-38 : Tension de sortie (v_t) et de champ (v_f) pour une référence échelon 134
Figure 4-39 : Tension de sortie (v_t) et de champ (v_f) améliorée..... 135
Figure 4-40 : Structure combinée de l'excitatrice et de la génératrice dans Simulink .. 135
Figure 4-41 : Tension et courant d'armature dans le repère abc après le délestage..... 136
Figure 4-42 : Zoom de la tension d'armature durant la période transitoire 137
Figure 4-43 : Tension d'armature et courant de champ après le délestage avec et sans système d'excitation 138
Figure 4-44 : Puissance à la sortie de la génératrice avec et sans régulateur de tension 138
Figure 4-45 : Présentation du régulateur de vitesse 140
Figure 4-46 : Régulateur mécanique 140
Figure 4-47 : Régulateur mécanique de vitesse 141
Figure 4-48 : Régulateur accélérométrique..... 142
Figure 4-49 : Équivalent PID du régulateur accélérométrique 142
Figure 4-50 : Structure du régulateur PID 143
Figure 4-51 : Régulateur PI de vitesse associé à une turbine idéale 144
Figure 4-52 : Régulateur PID de vitesse associé à la turbine idéale 147
Figure 4-53 : Résultats de simulation du régulateur de vitesse avec le modèle idéal.... 153
Figure 4-54 : Régulateur PID de vitesse avec gain G associé à la turbine idéale 154
Figure 4-55 : Simulation des résultats du régulateur PID amélioré 156
Figure 4-56 : Simulation du régulateur de vitesse amélioré 157

Figure 5-1 : Structure finale du simulateur numérique 159
Figure 5-2 : Présentation du simulateur en fonction des modèles utilisés pour chaque sous-ensemble 159
Figure 5-3 : Structure du simulateur numérique dans Simulink 160
Figure 5-4 : Structure du groupe #8 LG2 162
Figure 5-8 : Charges 165
Figure 5-9 : Opérations pendant les essais. 166
Figure 5-10 : Les attentes pour un comportement idéal 168
Figure 5-11 : Les tensions 173
Figure 5-12 : Les courants 175
Figure 5-13 : Résultats du circuit hydraulique 177
Figure 5-14 : Les tensions pour une charge capacitive 180
Figure 5-15 : Les puissances pour une charge capacitive 180
Figure 5-16 : Les tensions 182
Figure 5-17 : Les courants 183
Figure 5-18 : Puissances mécanique et électrique 183
Figure 5-19 : Vitesse de rotation 184

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Données initiales 16
Tableau 2-2 : Données du circuit hydraulique 21
Tableau 2-3 : Données du bassin amont 22
Tableau 2-4 : Données caractéristiques de la conduite forcée 23
Tableau 2-5 : Données caractéristiques de la turbine 24
Tableau 2-6 : Données caractéristiques du générateur 25
Tableau 3-1 : Quelques cas de viscosité dynamique de l'eau 36
Tableau 4-1 : Analogie de modèle hydraulique électrique 46
Tableau 4-2 : Données de la conduite forcée 51
Tableau 4-3 : Données du circuit des deux conduites forcées 60
Tableau 4-4 : Données de simulation du modèle idéal de la turbine 66
Tableau 4-5 : Paramètres de la machine asynchrone 112
Tableau 4-6 : Conditions initiales de la machine 112
Tableau 4-7 : coefficients de saturation 114
Tableau 4-8 : Données du constructeur de la génératrice 127
Tableau 4-9 : Données de simulation de la génératrice synchrone 127
Tableau 4-10 : Conditions initiales avant le court-circuit 128
Tableau 4-11 : Conditions initiales pour la détermination de la fonction de transfert ... 131
Tableau 4-12 : Données du système d'excitation 132
Tableau 5-1 : Données du groupe 8 LG2 Robert Bourassa 161
Tableau 5-2 : Données finales de la conduite forcée 163
Tableau 5-3 : Données de la turbine 163
Tableau 5-4 : Données du fluide 164
Tableau 5-5 : Caractéristiques de la vanne 164
Tableau 5-6 : Données de simulation d'une charge inductive 171
Tableau 5-7 : Données de simulation pour une charge capacitive 178
Tableau 5-8 : Données de simulation d'une charge résistive 181

Liste des symboles

H_m	pu	L'équivalent de l'inertie du rotor+ turbine
T_m	pu	Couple mécanique (commande mécanique) imposé par la turbine
T_e	pu	Couple électrique équivalent de la puissance électrique fournie par l'alternateur
D	-	Coefficient de frottement visqueux
ω_n	pu	Pulsation naturelle du réseau égale vitesse du rotor en régime permanent
δ	pu	Angle interne du rotor
$r_d = r_q = r_a$	pu	Résistance d'armature d'axe d et d'axe q
v_f	pu	Tension de champs
v_D, v_Q	pu	Tension des amortisseurs d'axe d et q
v_a, v_b, v_c	pu	Tension des enroulements a, b, c du stator
i_a, i_b, i_c	pu	Courant dans les enroulements a, b, c du stator
i_f	pu	Courant de champs
i_D et i_Q	pu	Courant des amortisseurs dans l'axe d et l'axe q
ψ_a, ψ_b, ψ_c	pu	Flux des enroulements a,b,c du stator
ψ_f	pu	Flux de la bobine de champs
ψ_D, ψ_Q	pu	Flux des amortisseurs sur l'axe D et Q
x_a, x_b, x_c	pu	Inductance des enroulements a, b, c du stator
x_f	pu	Inductance de la bobine de champs

x_D, x_Q	pu	Inductances d'axes d et q des amortisseurs
x_{em0}	h	Réactance de magnétisation non saturée du circuit d'excitation;
N_e	-	Nombre de spires du stator de l'excitatrice
R_e	Ω	Résistance du stator (inducteur) de l'excitatrice
σ	-	Coefficient de dispersion du flux de l'excitatrice
ρ	Kg/m^3	Masse volumique de l'eau
g	m^2/S	accélération de pesanteur
E_P	kg/J	Énergie de pression
E_g	kg/J	Énergie géodésique
E_c	kg/J	Énergie cinétique
z	m	hauteur géodésique
V	m/s	Vitesse de l'eau
Q/q	(m^3/s)/pu	Débit d'écoulement de l'eau
E	kg/J	Énergie totale
E_t	kg/J	Énergie totale à la turbine
H/h	m/pu	Hauteur de chute
ρ	Kg/m^3	Masse volumique de l'eau

D	m	Diamètre interne de la conduite forcée
e_c	m	Épaisseur de la conduite forcée
E_y	-	Coefficient de Young pour la conduite forcée
K_e	-	Coefficient caractéristique des bulbes dans l'eau.
P	N/m^2ou bar	pression de la colonne d'eau (1bar = 10^5 N/m^2 =10.2 m Hauteur manométrique P/ρg)
v	stockes	Viscosité cinématique (1 st= 1 cm^2/s)
$\Re$	-	Nombre de Reynolds
V_e	m/s	Vitesse moyenne de l'écoulement
D_i	m	Diamètre interne du tube
ρ_f	Kg/m^3	Masse volumique du fluide
A	m^2	Section du conduit
L	m	Longueur de la conduite
K_S	-	Coefficient de charge régulière
V_{pe}	m/s	Vitesse dans la plus petite section de passage ou à la sortie de la singularité
H_S	J/kg	Perte de charge singulière
Hr	J/kg	Pertes de charge régulière
a	m/s	Vitesse de l'onde dans le fluide
T_e	s	Constante d'élasticité de la conduite forcée
Z_0	-	Impédance de la conduite forcée
A_s	m^2	Surface interne de la chambre d'équilibre

A_t	m^2	Surface interne de la conduite de liaison
L_t	m	Longueur de la conduite avant la prise d'eau
T_s	s	Constante de temps de la chambre d'équilibre
P_m	pu	Puissance mécanique à la sortie de la turbine.
$\overline{P}_t$	pu	Puissance de la turbine
$\overline{P}_{AV}$	pu	Puissance de la turbine à vide
$\overline{g}$:	pu	Gain en à l'entrée
ω_m	pu	Vitesse de rotation de rotor
D_{pt}	-	Coefficient d'amortissement de la turbine

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'hydroélectricité représente la troisième source mondiale de production d'énergie électrique. Cette énergie renouvelable permet au Québec de se hisser au rang des pays les moins polluants en ce qui concerne les émissions des gaz à effet de serre [1]. Elle permet de réaliser une parfaite symbiose entre la qualité, la quantité, le coût et la durée de production de l'énergie électrique.

Des efforts sont régulièrement faits dans le domaine de la formation des opérateurs de centrale, et aussi dans l'optimisation des sites de production. L'université d'Abitibi-Témiscaminque et la compagnie Hydro-Québec ne sont pas en reste. Le partenariat entre ces deux institutions a conduit à la mise sur pied d'un dispositif de formation et d'expérimentation des centrales hydrauliques. La présente contribution à cette réalisation est la modélisation et l'implémentation numérique du simulateur analogique d'Hydro-Québec.

Ce chapitre introductif situe le simulateur dans son contexte socio-économique, présente la problématique et l'intérêt du simulateur numérique. Les objectifs spécifiques et la méthodologie pour les atteindre terminent le chapitre.

1.1 Contexte socio-économique

L'eau est omniprésente au Québec. Plus d'un million de fleuves, de rivières et de lacs couvrent près de 21 % du territoire [2]. En 1996, 97 % de l'énergie électrique disponible sur le réseau provincial était d'origine hydraulique. Hydro-Québec compte à lui seul, près de 530 barrages et digues, loin devant le gouvernement qui en compte à travers le ministère de l'Environnement environ 170 [2]. Avec 60 centrales hydroélectriques et une centrale nucléaire, Hydro-Québec constitue le principal producteur d'électricité au

Canada (Figure 1-1) et le plus grand producteur mondial en d'hydro-électricité. La puissance de ses installations s'établit à 36 671 mégawatts (MW) et elle comptait environ 4 millions de clients en 2010.

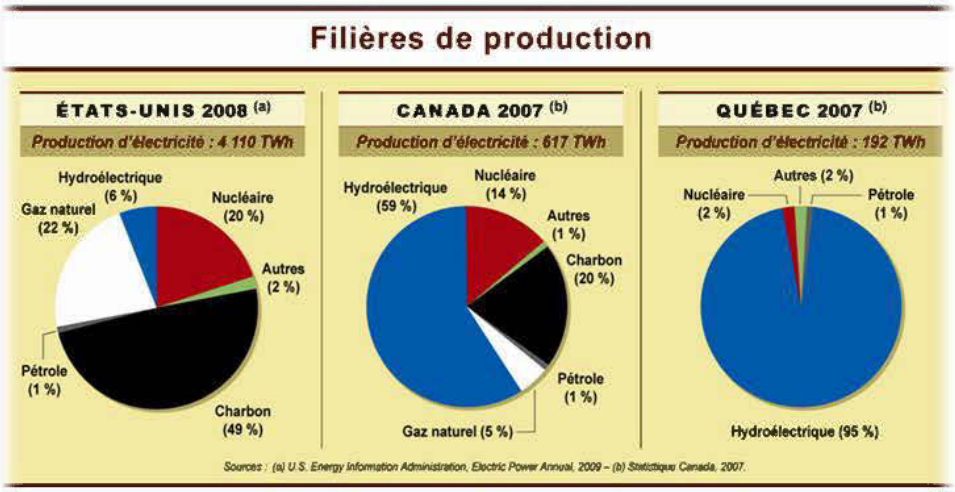
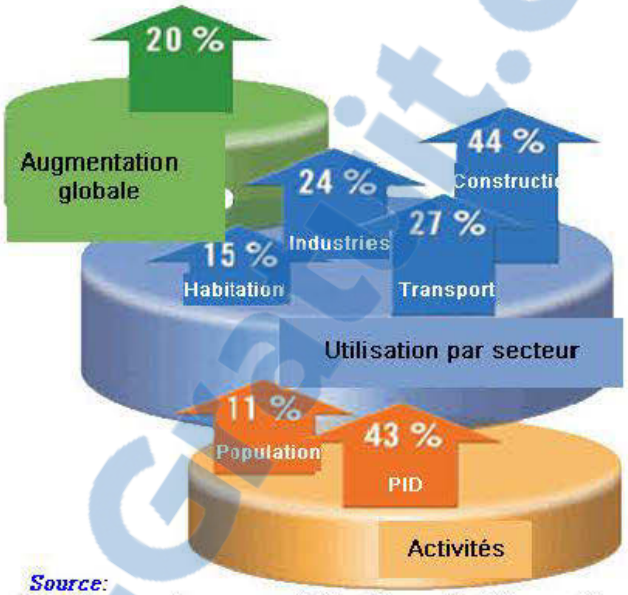


Figure 1-1 : Production énergétique en Amérique du Nord, au Canada et au Québec en 2007

En 2005 l'énergie électrique dite « patrimoniale » fournie par Hydro-Québec à ses clients s'élevait environ à 165TWh [3]. Cependant, un record de consommation interne de 169.2 TWh en 2005 avait contraint Hydro-Québec à s'approvisionner sur le marché de court terme au coût de 7.8 ¢ au lieu des 2.9 ¢ habituelles pour l'énergie dite « patrimoniale » [3]. D'après cette même source, les prévisions du gouvernement pour la demande sont d'environ 22 % entre 2001 et 2016 (Figure 1-2). Afin de pallier cette demande progressive de consommation, suivant une importante consultation, le gouvernement du Québec a rendu publique sa stratégie énergétique, définissant les buts à atteindre et les actions à entreprendre de 2006 à 2015 (site du MRFN) [4]. Ces objectifs sont énumérés en six volets dont :

- Développer l'hydro-électricité
- Développer le potentiel éolien existant
- Utiliser efficacement l'énergie

- Renforcer la sécurité des approvisionnements en pétrole et en gaz naturel
- Innover
- Réviser les stratégies législatives



Source:
http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfmtn/nrgyrprt/nrgdmnd/glblcndncntxt2008/glblcndncntxt-fra.html#cn-tphp

Figure 1-2 : Prévision de consommation énergétique entre 2005 et 2020

Parmi les moyens de production d'énergie électrique, l'hydraulique reste celle relevant les défis suivants :

- Grande quantité de production
- Moins polluant (Figure 1-3)
- Fiable et très durable.

La Figure 1-3 présente le taux d'émission du gaz carbonique dans l'environnement en fonction de différentes méthodes renouvelables de production d'énergie électrique. Pour chacune des méthodes, deux taux d'émission sont présentés. Il s'agit des émissions produites par une technologie typique actuelle (plus élevé en couleur foncée) et celles émisses par une technologie très performante pour les

RapportGratuit.com

combustibles fossiles ou d'excellents sites de production en matière d'énergie renouvelable (moins élevé en couleur blanche). Le gaz carbonique (CO_2) contribue énormément au réchauffement climatique. On remarque que, parmi ces méthodes renouvelables de production d'énergie électrique, l'hydroélectricité est celle émettant le moins de gaz à effet de serre [5]. Cette assertion est plus approuvée pour les centrales à fil d'eau, ne disposant pas des réservoirs de retenue.

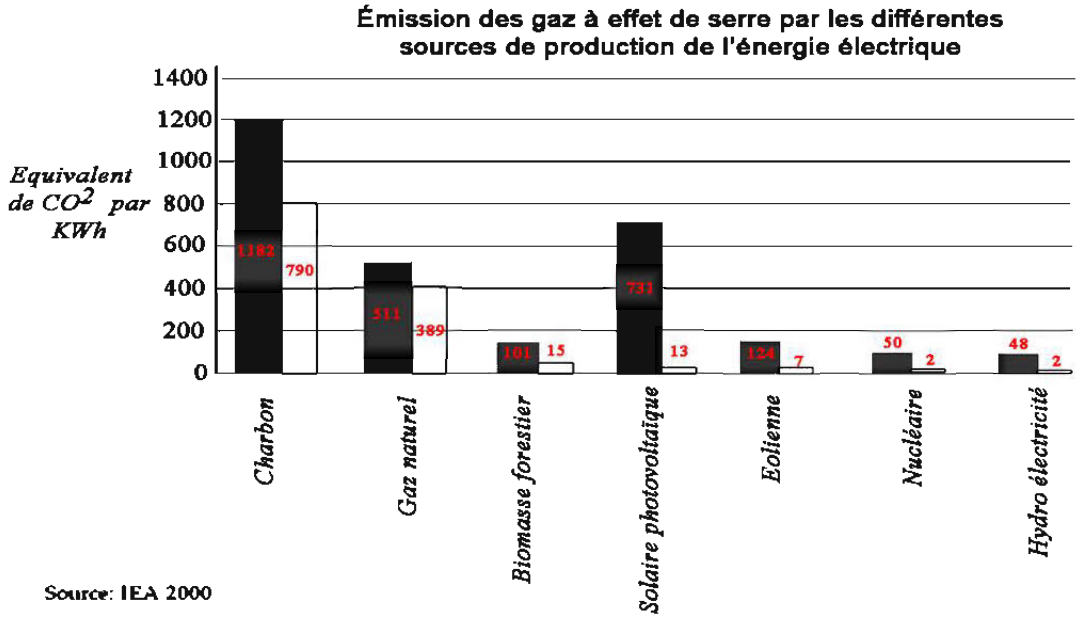


Figure 1-3 : Émission des gaz à effet de serre des différentes sources énergétiques

améliorer ses capacités et son efficacité dans l'hydroélectricité, contribuer à la politique gouvernementale, satisfaire les consommateurs à court, moyen et long terme sont des préoccupations permanentes à Hydro-Québec. Parmi les actions entreprises, la sécurité des sites, la formation du personnel actuel et futur (étudiants), occupent une place de choix.

1.2 Contexte socio-éducatif

Il est prouvé dans la littérature que les étudiants apprennent mieux quand ils prennent un rôle actif dans l'apprentissage par la discussion, la pratique, l'application des concepts et des idées [6]-[7]. Pour des raisons socio-économiques citées au paragraphe précédent, la formation du personnel est primordiale pour la principale entreprise de production d'énergie électrique du Québec. Cependant, cette formation est confrontée à certaines difficultés dont :

- La restriction des visites dans les centrales pour des raisons de sécurité
- L'impossibilité d'utiliser les centrales réelles pour les buts de formation
- L'absence de réels outils pour les travaux pratiques, les démonstrations et les expériences dans le domaine d'hydroélectricité.

Une solution à cette situation est la mise sur pied d'un simulateur analogique d'une centrale. Cette innovation majeure est née du partenariat entre Hydro-Québec et l'Université du Québec en Abitibi-Témiscaminque.

Ce simulateur sera pour le personnel de production actuel et futur (étudiants) d'Hydro-Québec, un outil pédagogique, de formation et d'expérimentation. Ce simulateur est actuellement analogique. La mise en œuvre de l'aspect numérique du simulateur est d'un intérêt certain.

1.3 Intérêts du simulateur numérique

La simulation numérique est un moyen performant d'analyse et de compréhension des phénomènes physiques. Cette méthode prend une part de plus en plus importante en recherche appliquée. En effet, pour décrire correctement le comportement d'un système, il devient nécessaire de faire appel aux modèles numériques de ses différentes composantes. La simulation numérique permet d'orienter le choix des approximations dans les approches analytiques et d'obtenir des résultats directement comparables à ceux

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

de l'expérience. Il s'agit ici d'un apport de la simulation à la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. Une fois cette compréhension établie, la simulation complète du système apporte une aide déterminante à la conception de nouveaux dispositifs et à la prévision des comportements possibles du système en fonction des variations de ses paramètres.

Dans l'optique d'apporter ces atouts majeurs au projet du simulateur, ce travail est orienté sur le thème: « ***Modélisation et implémentation numérique du simulateur analogique de la centrale Hydro Québec*** ».

Plusieurs logiciels dont SIMSEN, Power Systems, Labviews, LV TRANS, SDYN etc. sont utilisés pour la simulation des systèmes électriques. Ces derniers peuvent donc être utilisés dans le cas du simulateur analogique de la centrale Hydro-Québec. Ces logiciels présentent des blocs mis ensemble. Les équations et la procédure de modélisation sont un mystère pour les utilisateurs. Cependant, il faut noter que le simulateur est avant tout un outil pédagogique. L'objectif de ce travail est de mettre à la disposition des apprenants, un outil de recherche, d'apprentissage, à usage facile et à grande portée. Il permettra d'éviter les pertes de temps qu'exigent l'apprentissage d'un logiciel nouveau, mais d'exploiter un logiciel rependu dans les milieux étudiants qu'est Matlab /Simulink. Par ailleurs, il faut donner la possibilité aux utilisateurs de modifier les données et les paramètres des modèles. Ce qui est un atout important pour l'amélioration des performances du simulateur analogique et l'optimisation des différents régulateurs.

1.4 Objectifs spécifiques, méthodologie et organisation du document

L'objectif général visé par ce projet de recherche tel que schématisé à la Figure 1-4 est de pouvoir implanter un modèle numérique du simulateur analogique en construction à la centrale Hydro-Québec de la région d'Abitibi Témiscamingue, dans l'environnement MATLAB/Simulink.

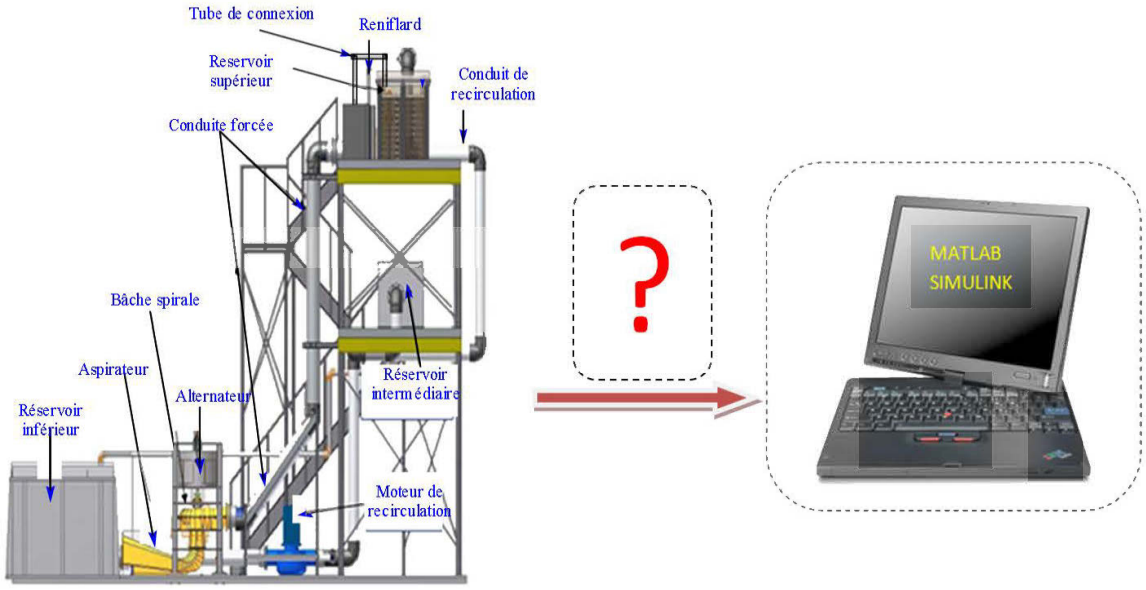


Figure 1-4 : Objectif général du thème

Afin d'atteindre cet objectif général, une méthodologie claire et simple liée aux objectifs spécifiques est suivie tout au long du travail. Elle est structurée comme suit :

- ***Le simulateur analogique***

Il s'agit ici, de faire une revue de la littérature ayant contribuée à bâtir le simulateur analogique, de ressortir ses différentes parties, le processus de sa mise en œuvre et de ses similitudes avec les centrales hydroélectriques réelles. C'est l'objet du chapitre 2.

- ***Modèles numériques des centrales hydroélectriques***

Le chapitre 3 est un aperçu des modèles numériques des centrales hydroélectriques. Dans un premier temps, un état non exhaustif des travaux faits sur la modélisation des centrales est présenté. Enfin, les paramètres et concepts mathématiques influençant les hypothèses de modélisation des circuits hydrauliques sont aussi présentés.

➢ *Modélisation des différents sous-ensembles*

Les chapitres précédents ont permis d'implanter une plateforme de travail. Il est question dans le chapitre 4 de modéliser les différents sous-ensembles introduits au chapitre 2, conformément à la littérature et aux éléments caractéristiques du Chapitre 3. La Figure 1-5 illustre la démarche suivie pour réaliser le modèle de chaque sous-ensemble. Cette démarche commence par les équations gouvernant le fonctionnement du sous-ensemble considéré. Ces équations peuvent être hydrauliques, mécaniques ou électriques. L'organisation de ces équations sous forme de modèle tient compte des objectifs (pédagogiques et scientifiques) désirés. Après l'implantation du modèle, une validation est faite par comparaison des résultats du sous-système avec ceux contenus dans la littérature. Les différents blocs sont ensuite mis ensemble et les résultats du modèle global sont comparés aux attentes. Les données de validation sont des valeurs réelles des sites ou celles contenues dans la littérature.

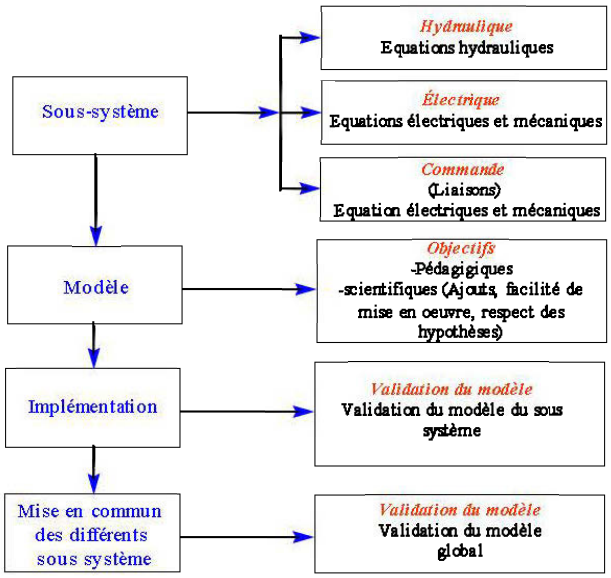


Figure 1-5 : Démarche à suivre

Dans chaque sous-système, les éléments sont modélisés séparément avant la mise en commun. La mise en œuvre de chaque élément par sous-système obéit à l'organigramme de la Figure 1-6.

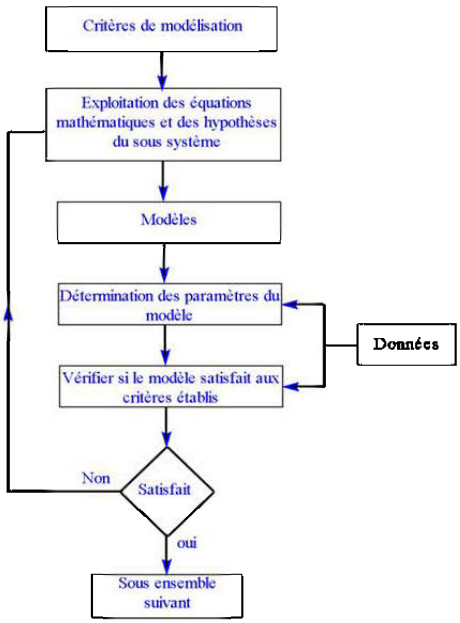


Figure 1-6 : Organigramme de modélisation

Avant de réaliser le modèle, une présentation introductive de chaque élément permet d'être proche de la réalité et d'avoir une idée générale des travaux existants. Dans la plupart des cas, les hypothèses de modélisation sont illustrées. Autant que possible, le modèle d'état est réalisé afin de permettre une exploitation des techniques offertes par ce dernier dans l'étude de stabilité et la détermination des paramètres.

- ***La mise en commun des différentes parties***

La mise en commun des différentes parties est faite au chapitre 5. Dans un premier temps, les schémas illustrant le modèle final sont présentés. Par la suite, un récapitulatif des valeurs des paramètres à utiliser est fait. Enfin, les différents essais sont présentés. Il est toutefois important de remarquer que, conformément aux organigrammes de la

Figure 1-5 et de la Figure 1-6, la validation se fait de façon progressive par élément et par sous-ensemble. Le moyen de validation le plus rencontré est la validation croisée.

1.5 Conclusion

Ce chapitre introductif justifie ce travail de recherche sur le plan scientifique, social, et économique. Il expose les objectifs et la démarche utilisés pour les atteindre. Il sera question dans la suite de présenter le simulateur analogique tout en faisant le rapprochement avec les centrales électriques réelles.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DU SIMULATEUR ANALOGIQUE, SIMILARITÉS AVEC LES CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES RÉELLES

Le simulateur analogique est en construction depuis 2003. Les données et informations à propos de ce dernier contenues dans ce chapitre sont tirées des documents [8-11]. Dans un premier temps, le chapitre fait état des généralités sur les centrales hydroélectriques. Par la suite, le processus de conception du simulateur est présenté. Le simulateur analogique est divisé en sous-ensembles et le rôle des différentes parties est exposé. Le schéma synoptique global termine le chapitre.

2.1 Production de l'énergie hydroélectrique

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.1.1 Structure d'une centrale hydraulique

Toute centrale hydroélectrique (Figure 2-1) fonctionne à partir de l'énergie hydraulique due à la dénivellation (loi de Bernoulli des équations (2.1) à (2.5)). Elle nécessite un cours d'eau ou une retenue d'eau. La centrale se compose d'un réservoir, d'une chute d'eau caractérisée par sa hauteur. L'énergie hydraulique est convertie en électricité par le passage de l'eau dans une turbine reliée à un alternateur. La puissance de la centrale dépend de la hauteur de chute et du débit d'eau.

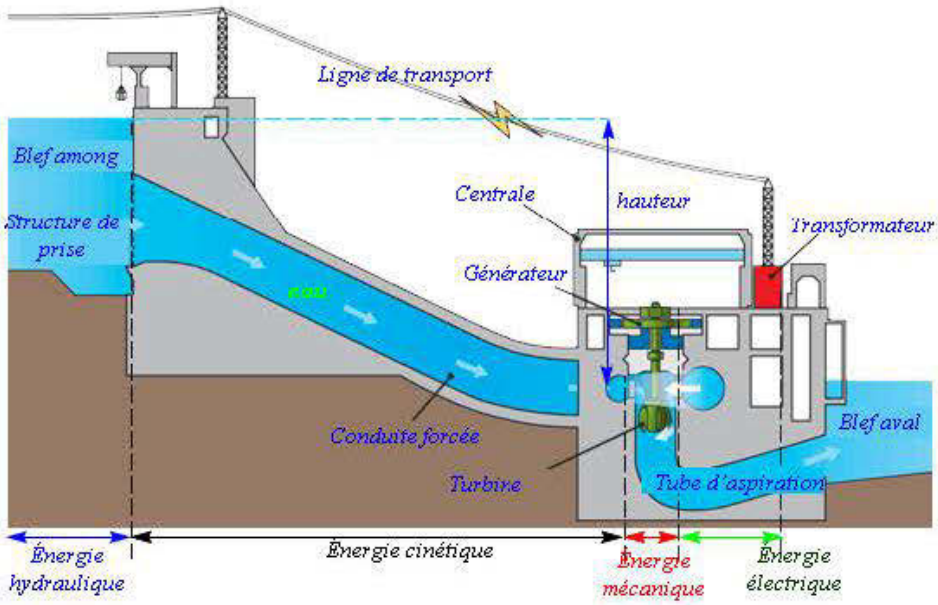


Figure 2-1 : Structure d'une centrale hydroélectrique

Selon la loi de Bernoulli, l'énergie hydraulique (2.4) est la somme de l'énergie de pression (2.1), géodésique (2.2) et cinétique (2.3) de l'eau :

$$E_P = \frac{P}{\rho} \tag{2.1}$$

$$E_g = 9.8z \tag{2.2}$$

$$E_C = \frac{V^2}{2} \; avec \; V = \frac{Q}{A} \tag{2.3}$$

$$E = E_C + E_P + E_g \tag{2.4}$$

$$E_t = E_1 - E_2 = gH \tag{2.5}$$

L'énergie totale absorbée par la turbine (E_t) est la différence entre l'énergie à l'entrée (E_1) de la turbine et l'énergie à sa sortie (E_2). V est la vitesse de déplacement du fluide (

m/s), Q est le débit d'écoulement de l'eau dans la conduite forcée(m^3/s), A est la section de la conduite forcée (m^2), H est la hauteur de la chute (m), ρ est la masse volumique de l'eau (Kg/m^3), g est la constante de gravitation (m^2/s), z est la hauteur géodésique (m), P est la pression de la colonne d'eau (N/m^2).

Certaines centrales fonctionnent en exploitant l'énergie fournie par les marées ou par les vagues. Leur nombre reste toutefois très limité. Les centrales hydrauliques ont une puissance qui peut aller de quelques milliers de watts pour une minicentrale individuelle (destinée à alimenter une seule habitation) à des milliers de MW (mégawatts) pour un barrage de grande importance. Plusieurs variantes des centrales hydrauliques existent. Elles peuvent tenir compte de la hauteur, de la puissance fournie, du mode de production, ou du type de turbine. Les types de turbines rendent spécifiques les centrales. Cette spécificité est vérifiée dans la méthode utilisée lors de la conversion de l'énergie hydraulique en énergie mécanique. Pour cela on distingue trois types de turbine présentés dans la section suivante.

2.1.2 Les types de turbines

2.1.2.1 *La turbine Kaplan*

La turbine Kaplan dont une image est présentée à la Figure 2-2 est une « turbine à réaction ». La vitesse de l'eau diminue depuis l'entrée des directrices jusqu'à l'hélice à sa sortie. L'eau en torsion s'écoule parallèlement à l'arbre, arrivant sur le rotor en pleine admission, où la pression destinée à la conversion de l'énergie est de plus en plus réduite. Des mesures spécifiques ont été prises pour prévenir la cavitation. Le débit est contrôlé par l'ouverture des directrices. Le rendement optimal est contrôlé par l'ajustement des pales. Ces derniers sont orientables et permettent, par simple variation de leur inclinaison d'ajuster la vitesse de rotation des turbines. La turbine est accolée à l'alternateur. Grâce à un système de protection étanche, ces groupes peuvent être

Rapport-Gratuit.com

complètement immergés dans l'eau. La turbine Kaplan est utilisée dans les usines à basse chute.

Source
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:KaplanTurbineLinzAustria.JPG

Figure 2-2 Illustration d'une turbine hydraulique du type Kaplan

2.1.2.2 *La turbine Pelton*

La turbine Pelton, dont une photo est présentée à la Figure 2-3, est constituée d'une roue, sur la périphérie de laquelle sont fixées des séries de cuillères doubles métalliques appelées augets. C'est une turbine à injection partielle et à veine libre. Sa roue tourne dans l'air. La détente de l'eau jusqu'à la pression atmosphérique est donc entièrement effectuée dans le distributeur de la machine. L'énergie est disponible à l'entrée de la roue uniquement sous forme d'énergie cinétique. Ce qui correspond à la définition d'une machine à action. Cette turbine ne comporte pas de diffuseur. À la sortie de la roue, l'eau s'écoule librement. La turbine Pelton, généralement réservée aux usines de haute chute (de 300 à 1800 mètres).

source
http://www.energiedouce.com/content/21-conseils-faq-hydro-turbines-et-turbines-hydroelectriques

Figure 2-3 : Illustration d'une turbine hydraulique du type Pelton

2.1.2.3 *La turbine Francis.*

La turbine Francis (Figure 2-4) est celle dont le domaine d'utilisation est le plus vaste. Elle peut fonctionner dans des conditions de hauteur de chute très étendue : de quelques dizaines de mètres jusqu'à 800 m. La puissance unitaire peut atteindre des valeurs considérables.

D'une part, des études hydrauliques très poussées ont permis l'augmentation des puissances et débits spécifiques, l'amélioration des rendements et de la tenue à la cavitation des roues ainsi qu'une connaissance approfondie des phénomènes transitoires. D'autre part, la conception mécanique (alliée à une grande maîtrise dans les calculs de structure) et la connaissance du comportement dynamique des groupes – vibrations – (complétée par une qualité de construction très poussée) garantissent une grande fiabilité de fonctionnement. Dans le domaine des puissances plus modestes, on trouve les turbines Francis horizontales simples et doubles, de grande vitesse de rotation. En particulier, les turbines doubles permettent de réaliser des installations très économiques et compétitives (de bon rendement aux charges partielles).

Source
http://heew.en.alibaba.com/product/226762246-0/Francis_Turbine_Runner.html

Figure 2-4 : Illustration d'une turbine Francis

La gestion de la puissance se fait au niveau de l'ouverture des directrices par gestion du débit d'eau à l'entrée. Cette turbine à réaction est la plus utilisée par Hydro-Québec. Elle facilite grâce aux caractéristiques du prototype à réaliser un modèle réduit de centrale.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

C'est le principe de base de mise en œuvre du simulateur tel que présenté dans le paragraphe suivant.

2.2 Processus de conception du simulateur analogique

La Figure 2-5 présente le simulateur analogique. Il s'agit d'une copie à échelle réduite de la centrale Robert Bourassa (LG2) [11]. L'homologie des puissances implique avant tout une parfaite similitude entre le modèle et le prototype. La mise en œuvre du simulateur analogique a été faite à partir des lois de similitudes présentées aux équations (2.6) à (2.10). Le processus de mise en œuvre s'est opéré de la manière suivante:

- Tenant compte du lieu de sa situation, les paramètres essentiels dont la hauteur de la chute, le débit d'écoulement d'eau, la puissance et la vitesse de rotation de la turbine ont été fixés (Tableau 2-1) [11]

Tableau 2-1 : Données initiales

Grandeur	Valeur
Hauteur de chute	Entre 5 et 5.75 m
Débit	$0.06m^3/S$
Puissance	3kW
Vitesse de rotation	720 tr/min

- Par la suite, le diamètre de la roue est choisi.
- À partir des lois de similitude (équations (2.6) à (2.10)) et les centrales réelles existantes, on recalcule les paramètres fixés.

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \tag{2.6}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \tag{2.7}$$

$$N_{11} = \frac{D_1 N_1}{\sqrt{H_1}} = \frac{D_2 N_2}{\sqrt{H_2}} \tag{2.8}$$

$$Q_{11} = \frac{Q_1}{D_1^2\sqrt{H_1}} = \frac{Q_2}{D_2^2\sqrt{H_2}} \tag{2.9}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \tag{2.10}$$

N_{11} et Q_{11} sont respectivement les valeurs unitaires de la vitesse de rotation et du débit

H , N et D sont respectivement la hauteur, la vitesse de rotation et le diamètre des éléments de la centrale considérée. Les indices 1 et 2 désignent la centrale ou le simulateur selon le choix.

- La centrale choisie comme référence sera celle dont les valeurs sont les plus proches des celles fixées. Ce sont ces valeurs qui seront utilisées pour la mise en œuvre du simulateur analogique de la Figure 2-5.

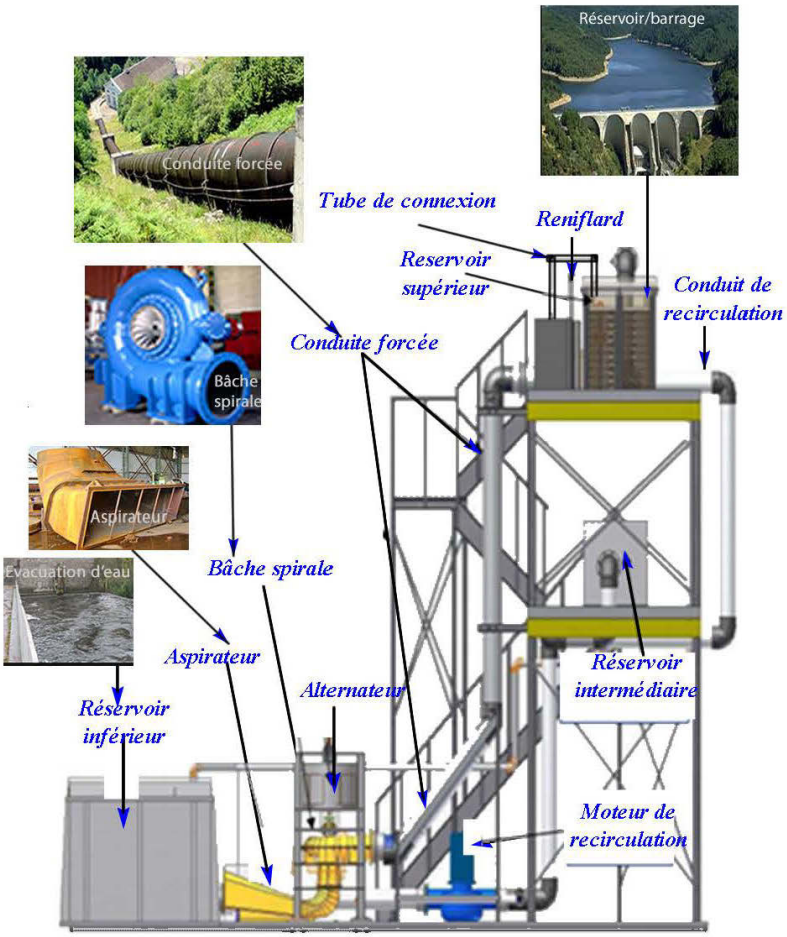


Figure 2-5 : Simulateur analogique

La Figure 2-5 présente une similitude avec les centrales réelles. Toute centrale peut être scindée en trois grandes parties comme illustrées dans la suite.

2.3 Différentes parties et rôle des éléments du simulateur analogique

En dehors de l'ossature, le simulateur peut être subdivisé en trois grands sous-ensembles tels que présentés par la Figure 2-6. Il s'agit du circuit hydraulique, du circuit électrique et des circuits de contrôle. Chaque sous-ensemble est représenté dans un carré de la Figure 2-6. Le fonctionnement du système global est une action réciproque (indiquée par les flèches à double direction) entre les différents sous-ensembles.

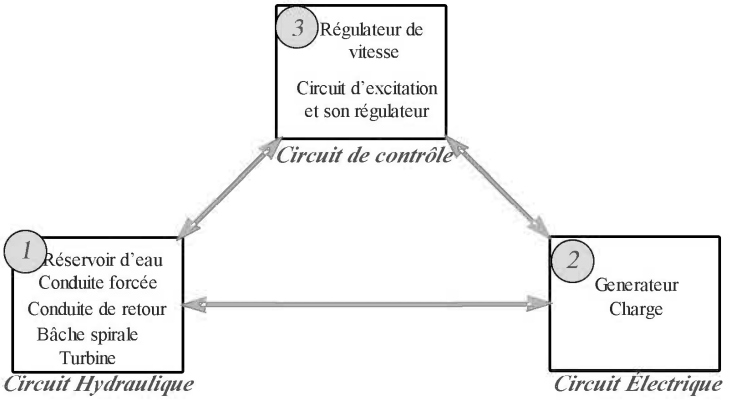


Figure 2-6 : Les trois sous-ensembles du simulateur

La relation entre ces sous-ensembles est illustrée à la Figure 2-7. Le degré d'ouverture des vannes ***α ou y*** est décidé par le régulateur de vitesse. Cette décision est fonction de l'information fournie à l'automate sur la vitesse de rotation. La vitesse de rotation varie selon les différences entre la puissance électrique P_e décidée par la charge, et la puissance mécanique P_m fournie au niveau de la turbine. Le régulateur réalise donc l'équilibre entre les puissances mécanique et électrique en adaptant la puissance mécanique à l'entrée du comparateur. Cette puissance mécanique dépend du débit dans le circuit hydraulique. Ce débit est décidé par la position ***α ou y*** des directrices. De même, les informations sur la tension de sortie v_s ou $\mathbf{v_t}$ sont fournies à l'automate. Ce dernier renvoie cette information à l'excitatrice qui décide de la tension de champ v_f ou (quantité de courant de champ) fournie par l'excitatrice afin de maintenir constante la tension v_s ou $\mathbf{v_t}$ de sortie.

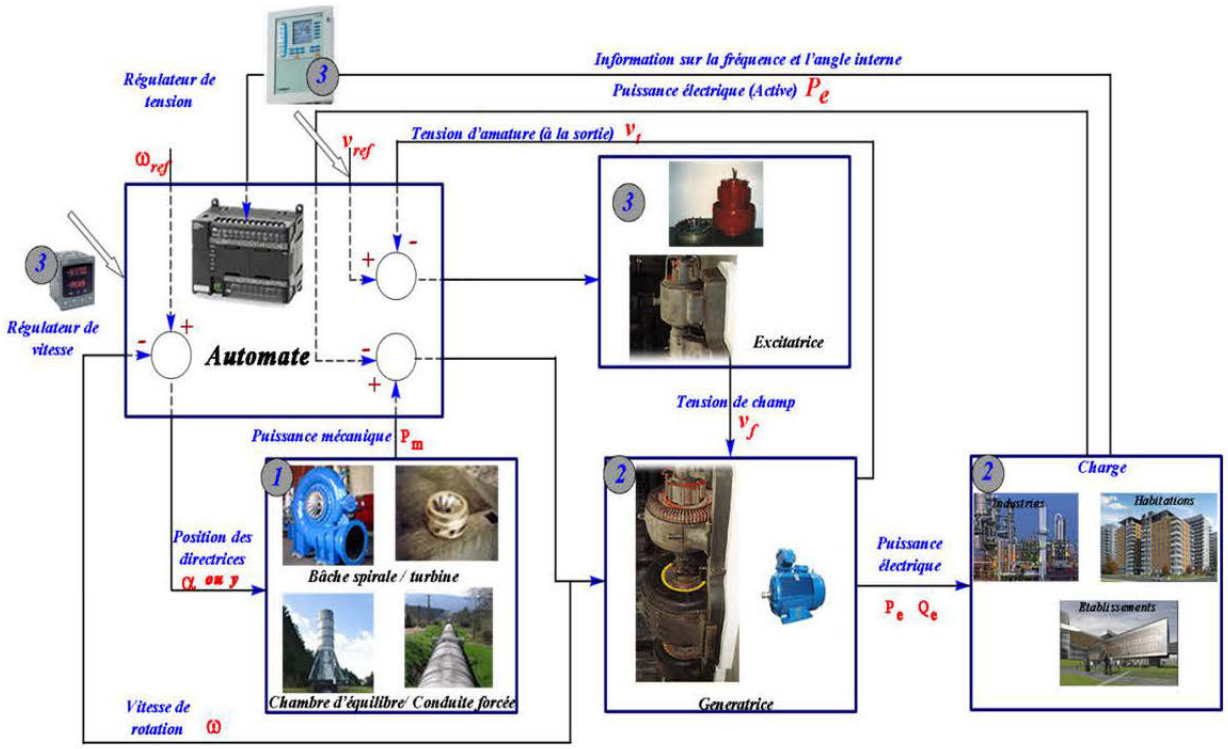


Figure 2-7 : Relation entre les différentes parties du simulateur

2.3.1 Le circuit hydraulique

Le rôle global de cette partie est d'assurer la transformation de l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique transmise à l'arbre du moteur. Le Tableau 2-2 [11] présente les données de ce circuit.

Tableau 2-2 : Données du circuit hydraulique

Variables déterminées	Symboles	Résultats	
Hauteur de chute géométrique	H_g	5.0	m
Diamètre de la conduite forcée	D	0.254	m (10 po)
Pression bassin amont	P_1	10.0	N/cm^2
Pression avant la bâche spirale	P_2	13.62	N/cm^2
Pression à l'entrée de la turbine	P_3	12.51	N/cm^2
Pression à l'entrée de l'aspirateur	P_4	8.84	N/cm^2
Pression au bassin aval	P_5	10.0	N/cm^2
Pression coup de bélier	$P_{bélier}$	19.86	PSI
Vitesse au bassin amont	C_1	0.0	m/s
Vitesse à l'entrée de la bâche spirale	C_2	1.19	m/s
Vitesse à l'entrée de la turbine	C_3	3.69	m/s
Vitesse à l'entrée de l'aspirateur	C_4	1.92	m/s
Vitesse au bassin aval	C_5	0.0	m/s
Vitesse tangentielle à la turbine	U_3	13.94	m/s
Angle des directrices	α_3	15.0	O
Rotation par minute de la turbine	N	720	RPM
Rayon extérieur de la turbine	R_e	185.0	mm
Rayon intérieur de la turbine	R_i	100.0	mm
Hauteur des aubes	H_a	70.0	mm
Puissance efficace fournie	P_{eff}	3000,0	W
Débit volumique	Q_V	60.5	l/s
Travail utile à fournir par l'eau	W_u	49.72	J/kg

2.3.1.1 *Les réservoirs*

Le simulateur comporte deux réservoirs :

- Le réservoir supérieur représente l'ensemble constitué par le barrage et le réservoir d'eau dans une centrale réelle. Dans le cas du simulateur, il s'agit d'un bassin pouvant contenir environ 4.262 m^3 d'eau. Les dimensions de ce dernier sont contenues dans le Tableau 2-3.
- Le réservoir aval reçoit l'eau dont l'énergie cinétique restante est amortie par l'aspirateur. Dans la centrale réelle, ce réservoir est le cours d'eau aval. Il n'existe donc pas. L'eau recueillie dans ce réservoir est retournée via l'aspirateur et les conduites de retour ou réinjectée directement dans le circuit selon le type de fonctionnement choisi pour le simulateur.

Tableau 2-3 : Données du bassin amont

Données	Valeur
Longueur extérieure du bassin (L)	4.056 m
Largeur extérieure du bassin (l)	1.006 m
Hauteur maximale de l'eau dans le bassin (H)	1.115 m
Hauteur de conception du bassin	1.215 m
Volume de l'eau : V= L*l*H	4.262 m^3
Masse d'eau = ρ*V	4253,54 kg
Masse du bassin vide	430 kg

2.3.1.2 *Les conduites*

Avec leur diamètre de 0.254 m et un débit de 0.0646 m^3/s, les conduites sont celles de la chute et les tuyaux permettant le retour de l'eau à partir du réservoir aval. L'aspiration de l'eau dans le circuit aval est assurée par la pompe. Le circuit de retour d'eau n'existe pas dans les centrales normales. Les données du circuit de la conduite sont regroupées dans le Tableau 2-4

Tableau 2-4 : Données caractéristiques de la conduite forcée

Item	Quantité	Type	Calibre	Diamètre nominal	Longueur (m)
1	1	Assemblage de brides tournantes	Schedule 40	0.254	-
2	1	Tuyau	Schedule 40	0.254	0.381
3	1	Coude 90	Schedule 40	0.254	-
4	1	Tuyau	Schedule 40	0.254	3.3528
5	2	Coude 45	Schedule 40	0.254	-
6	1	Tuyau	Schedule 40	0.254	1.778
7	1	Tuyau	Schedule 40	0.254	0.381

2.3.1.3 *La bâche spirale*

Dans cette centrale à turbine Francis, l'eau arrive à la turbine en passant par la bâche spirale (Figure 2-8). Elle permet d'uniformiser la vitesse de l'eau au niveau des aubes de la turbine. Les directrices mobiles guidées par le servomoteur et son dispositif de vannage permettent d'adapter la puissance de l'eau à celle de la charge et des pertes dans l'alternateur tout en tenant compte du rendement. Ceci grâce à une variation des angles des directrices (Figure 2-10). En situation d'urgence, on peut utiliser les directrices pour arrêter l'accès d'eau à la turbine. Cependant, une vanne est située au niveau du réservoir supérieur et l'autre à l'entrée de la bâche spirale pour assurer cette fonction.

source [11]

Figure 2-8 : Bâche spirale

Rapport-Gratuit.com

2.3.1.4 *La roue et l'aspirateur*

La roue transforme l'énergie cinétique et potentielle hydraulique en énergie mécanique rotative. Son diamètre est de 0.206 m (Tableau 2-5). L'énergie restante de l'eau est amortie par l'aspirateur. Un aspirateur adéquat a une forme conique avec un angle pas assez large afin d'éviter une discontinuité d'écoulement. La conception de l'aspirateur a pris en compte le phénomène de cavitation ayant des effets très néfastes pour la turbine. C'est un phénomène qui se produit dans les centrales fonctionnant avec les turbines de type Francis ou Kaplan. La Figure 2-9 présente une vue d'une roue dans sa bâche spirale.

Figure 2-9 : Roue dans la bâche spirale

Tableau 2-5 : Données caractéristiques de la turbine

Paramètres	valeurs	
Vitesse de la turbine	514, 600, 720, 900, 1200	(m/s)
Diamètre de la turbine	0.2585	(m)
Débit de l'eau	0.06	(m^3/s)
Hauteur de la chute	5	(m)
Puissance de la chute	2937	(W)

2.3.2 Le circuit électrique

La transformation de l'énergie mécanique rotative de la turbine en énergie électrique est assurée par le générateur. Le générateur utilisé pour le simulateur a une puissance de 3.7KVA pour une vitesse de rotation de 720tr/min. La tension en sortie est fixée à 600 V (Tableau 2-6). La Figure 2-10 présente l'ensemble turbo alternateur accouplé à la turbine et son dispositif de vannage.

Tableau 2-6 : Données caractéristiques du générateur

Type	Synchrone
Position	Verticale
Fréquence	60 Hz
Connexions	Triphasées
Montage	Étoile
Vitesse de rotation	720 RPM
Nombres de pôles	10 pôles
Type de pôles	Saillants
Tension de sortie	600V

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

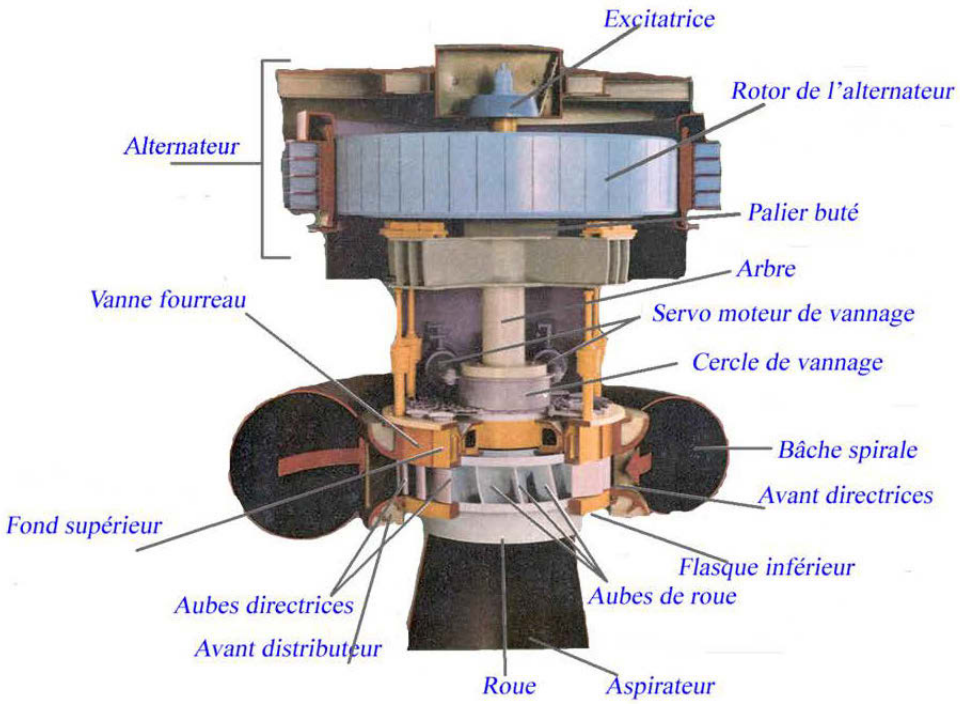


Figure 2-10 : Groupe turboalternateur

L'énergie électrique disponible à la sortie de l'alternateur permet d'alimenter une charge électrique.

2.3.3 Le circuit de contrôle

Deux dispositifs essentiels tels que présentés à la Figure 2-11 permettent d'assurer les régulations de la tension et de la vitesse. La régulation de tension décide de la course des servomoteurs du système de vannage. Elle permet de maintenir la vitesse de rotation constante par adaptation de la puissance mécanique telle que présentée au paragraphe 2.3. La régulation de la tension en sortie est assurée par le régulateur de tension et l'excitatrice. La vitesse de fonctionnement de la génératrice intimement liée à la fréquence électrique est fixée à 720tr/min. La tension à la sortie doit constamment être maintenue à 600 V.

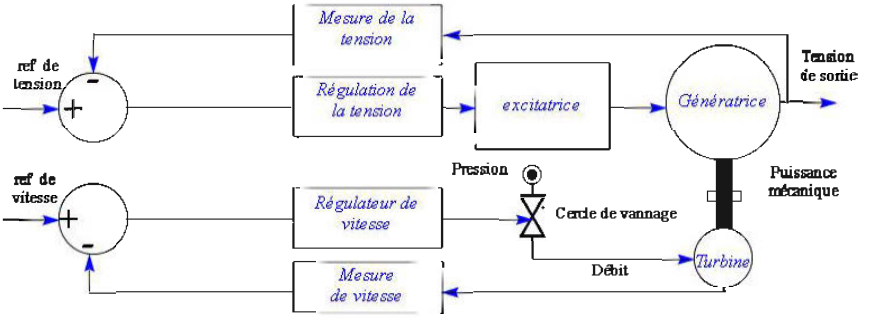


Figure 2-11 : Circuit de contrôle

2.3.3.1 *L'excitatrice et son régulateur de tension*

Le rôle élémentaire du système d'excitation est de fournir un courant et une tension continue en qualité et en quantité suffisante au circuit de champ de la machine synchrone. La quantité indique que le courant fourni doit permettre de maintenir constante la tension de sortie de la machine synchrone, quelle que soit la charge à la sortie. Ceci en comblant la demande en énergie réactive. La fonction qualité indique que la régulation de tension de sortie doit être automatique, le courant, la tension et le champ fournis doivent être dans les limites exigées par la machine et contribuer à la stabilité de cette dernière et du réseau. La variation du courant de champ permet de varier la puissance réactive fournie par la génératrice synchrone. Cette puissance doit correspondre à celle demandée par le circuit afin de maintenir la tension constante. Le circuit d'excitation doit être en mesure de répondre aux perturbations provoquées dans la génératrice synchrone par les régimes transitoires et dynamiques du système. En effet, une tension de champ trop élevée appliquée à la machine provoque l'isolement du rotor, un courant de champ trop élevé provoque l'échauffement des enroulements du rotor, un courant d'armature trop élevé provoque l'échauffement des enroulements au stator, une sous-excitation ou une surexcitation engendre un échauffement du noyau magnétique. Les limites d'échauffement de la génératrice ne doivent pas excéder 15 secondes à une minute [12]. La réponse du système d'excitation aux différentes sollicitations doit être adéquate et rapide. Le diagramme fonctionnel du circuit d'excitation est présenté à la Figure 2-12.

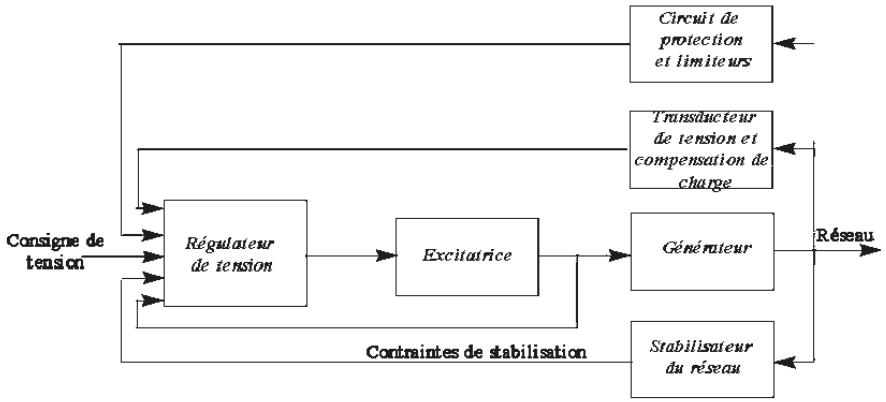


Figure 2-12 : Diagramme fonctionnel du circuit d'excitation

La littérature présente essentiellement trois types de système d'excitation [12]:

- Le système d'excitation à courant continu
- Le système d'excitation à courant alternatif
- Le système d'excitation statique.

Ces différents modèles sont largement présentés dans le document de référence [12].

Dans les centrales hydroélectriques actuelles, l'excitation est soit du type à courant alternatif ou statique.

2.3.3.2 *Le régulateur de vitesse*

La fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la génératrice synchrone sont liées. Afin de maintenir la fréquence du réseau dans une plage acceptable, le dispositif de régulation de vitesse est nécessaire. Par ailleurs, le régulateur assure l'équilibre entre la puissance électrique à la sortie de la génératrice synchrone et la puissance mécanique disponible au niveau de la turbine. Il est de ce fait associé au dispositif de vannage.

Pour le cas du présent simulateur, la vitesse de rotation de la turbine est fixée à 720tr/min. Les types de régulateur associés aux centrales alimentant une charge isolée sont des régulateurs PID. La gestion des signaux au niveau du dispositif de vannage est

présentée à la Figure 2-13. Cette gestion de signaux concorde avec les explications du paragraphe 2.3.

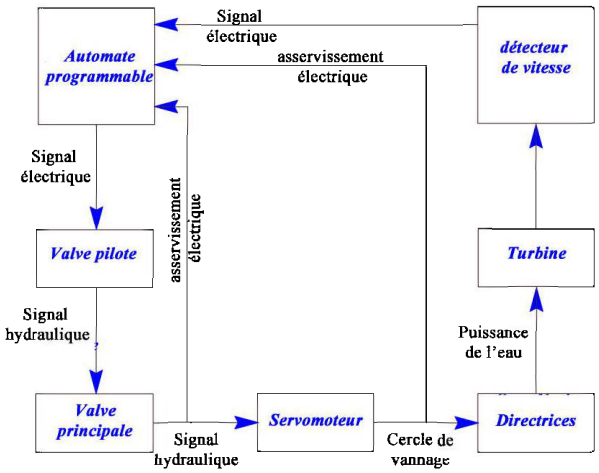


Figure 2-13 : Transmission des signaux du dispositif de vannage

Le régulateur PID est intégré dans l'automate. Son diagramme fonctionnel est présenté à la Figure 2-14. Ce schéma est inclus dans la Figure 2-7. Dans ce cas, elle est plus explicite et illustre plus clairement le fonctionnement du régulateur de vitesse. C'est un schéma de principe rencontré dans la plupart des documents de modélisation des centrales hydroélectriques. Les modèles comme nous l'avons déjà dit, font abstraction du système d'excitation.

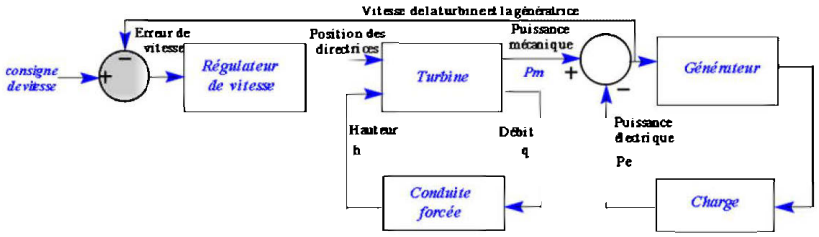


Figure 2-14 : Diagramme fonctionnel du régulateur de vitesse

La mise en commun de toutes les parties comprenant le circuit hydraulique, le circuit électrique, le circuit de contrôle, dont l'automate programmable et les différents

régulateurs, permet d'obtenir le synoptique global du simulateur analogique (Figure 2-15).

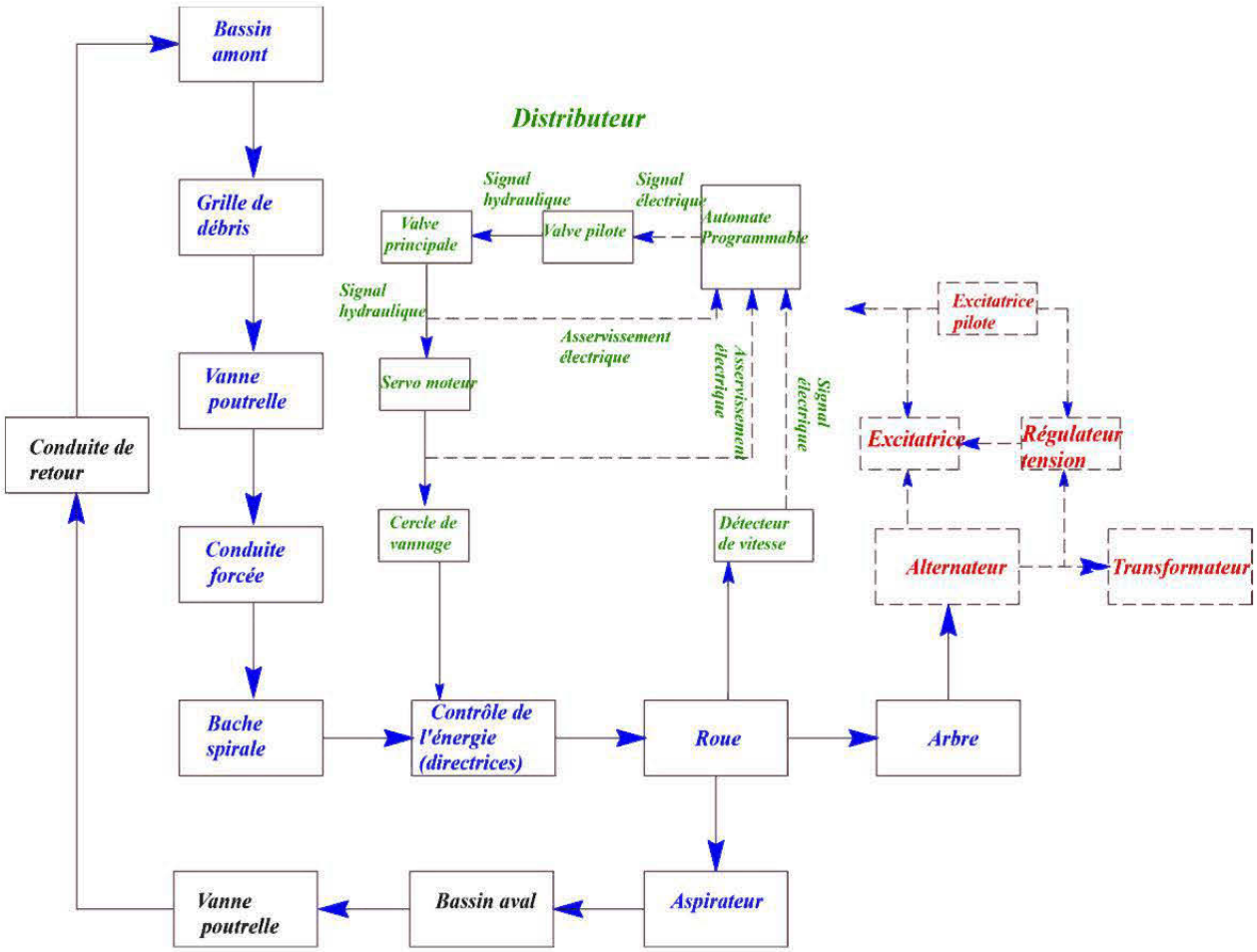


Figure 2-15 : synoptique final du simulateur analogique

2.4 Fonctionnement du simulateur

En résumé, le simulateur comporte un réservoir d'une capacité d'environ 4.262 m^3, devant faire fonctionner la turbine pour au moins une minute. Ce réservoir alimente la turbine en eau via la conduite forcée et la bâche spirale. Le diamètre de la conduite forcée est de 0.254 pour un débit de 0.06 m^3/s. L'alternateur synchrone d'environ 3.7 KVA reçoit de la chute une puissance estimée à 2937 W pour la transformer en

puissance électrique. L'aspirateur permet d'amortir la puissance de l'eau avant son entrée dans le bassin aval. Le régulateur de vitesse associé au mécanisme de vannage permet de maintenir la vitesse de l'alternateur à une valeur de 720tr/min. Le système d'excitation et son régulateur de tension permettent de maintenir constante la tension à la sortie du générateur à une valeur de 600 V. Dans le cas du simulateur, compte tenu des conditions de fonctionnement, il n'a pas été jugé utile d'installer le grillage et la vanne poutrelle. Le pertuis de la prise d'eau et son reniflard permettent d'éviter les bulles d'air dans la turbine pouvant causer le phénomène de cavitation ou de coup de bélier. Une étude de similarité a été faite avec la centrale Robert Bourassa II. Deux éléments essentiels sont disposés dans le bassin amont : le nid d'abeille qui permet d'atténuer les turbulences provoquées par l'arrivée de l'eau et le dispositif anti vague. L'opérateur aura le choix entre le fonctionnement à boucle ouverte utilisant le réservoir amont, ou le fonctionnement à boucle fermée en permettant une circulation continue de l'eau dans le circuit.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de comprendre le fonctionnement des centrales hydroélectriques en général et celui du simulateur en particulier. Le simulateur a été scindé en trois grands sous-ensembles. Ces différents sous-ensembles devront être modélisés dans la suite. Cependant, avant d'y arriver, il est indispensable d'avoir une idée sur les travaux faits sur la modélisation des centrales hydrauliques ainsi que les phénomènes et paramètres influençant les hypothèses de modélisation. C'est l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 3

LES SIMULATEURS NUMÉRIQUES DES CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES

Ce chapitre commence par un bref historique sur la modélisation numérique des centrales hydrauliques. Par la suite, les phénomènes dont dépendent les hypothèses simplificatrices de mise en œuvre du modèle du circuit hydraulique sont présentés.

3.1 Les modèles dynamiques

L'étude d'un modèle dynamique numérique d'une centrale hydroélectrique peut être divisée en deux grandes périodes [13]. Avant les années 1990, la plupart des travaux étaient centrés sur le développement d'un modèle précis d'une centrale hydroélectrique. Par la suite les efforts ont été réorientés vers l'amélioration des modèles existants. En 1962, Oldenburger obtint la réponse en fréquence d'une turbine à Apalchia, dans la centrale de la vallée de Tennessee, afin d'apprécier le modèle d'une conduite forcée avec élasticité de la conduite forcée [14]. Les équations aux dérivées partielles ont été transformées en équations ordinaires et ont été résolues. Hovey [15] présenta la procédure pour le calcul de la constante de temps du modèle dynamique ainsi que aussi le paramétrage du régulateur de vitesse. Woodward établit en 1967, la relation entre la position réelle et la position idéale des vannes directrices [16]. Dans les années 1970, le modèle idéal linéaire a été introduit [17]. Plusieurs autres travaux sont faits pour l'amélioration de ces modèles jusqu'en 1992 et 1994 où deux importants résumés des travaux sur la représentation numérique des centrales hydroélectriques furent publiés [12, 18].

L'orientation aujourd'hui consiste à l'amélioration des travaux déjà effectués.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Dans la plupart des cas, le circuit hydraulique est celui qui retient le plus l'attention. La complexité de ce dernier et son impact dans le fonctionnement des modèles numériques des centrales en sont les raisons fondamentales. Considérant ce dernier, les différences dans la documentation sont variées et orientées vers:

Les méthodes utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles de mouvement (3.1) et de continuité (3.2), décrivant l'écoulement transitoire d'un fluide dans une conduite forcée

$$\frac{\delta H}{\delta x}+\frac{1}{gA}\frac{\delta Q}{\delta t}+\frac{fQ|Q|}{2gDA^2}=0 \qquad (3.1)$$

$$\frac{\delta Q}{\delta x}+\frac{gA}{a^2}\frac{\delta H}{\delta t}=0 \qquad (3.2)$$

Avec

$$a=\sqrt{\frac{g}{\alpha}};\ \alpha=\rho g\left(\frac{1}{K_e}+\frac{D}{e_c E_y}\right) \qquad (3.3)$$

D est le diamètre de la conduite forcée(m), a est la vitesse de propagation des ondes dans l'eau (m/s), t est le temps (s), E_y Coefficient de Young, K_e est le coefficient caractérisque des bulbes dans l'eau, e_c est l'épaisseur de la conduite forcée (m), x est le déplacement (m).

Les procédures de résolutions anciennes (arithmétique, graphique, algébrique), cèdent progressivement place aux nouvelles méthodes (la méthode des caractéristiques, des matrices de transfert, des impédances, les méthodes numériques) qui deviennent plus précises et faciles à utiliser. Ces procédures de résolution sont entre autres [19, 20] :

- La méthode arithmétique (méthode d'Allievi)
- La méthode graphique (méthode de Schnyder-Bergeron)

Rapport-Gratuit.com

- La méthode des caractéristiques
- La méthode algébrique
- La méthode des matrices de transfert
- La méthode des impédances

L'exploitation de ces nouvelles approches de résolution permet l'élaboration des documents orientés vers :

- La mise en œuvre des outils facilitant l'implémentation des modèles numériques des centrales [21, 22]
- L'étude de l'impact d'une hypothèse quelconque sur le comportement dynamique du système [23-25]
- Etc.

La morphologie du système étudié

Il s'agit dans ce cas de la présence ou non des chambres d'équilibre, leur position dans la centrale [26], de la prise en compte ou non de l'aspirateur [26].

La modélisation du circuit de contrôle dans la presque totalité des cas concerne uniquement le régulateur de vitesse dont la détermination des paramètres est assez convergente [12, 22, 27]. La génératrice étant représentée par son équation mécanique. Le système d'excitation n'est donc pas pris en compte.

Dans le cadre de ce document, un système complet est présenté. Il s'agit d'un modèle permettant d'apprécier le comportement général d'une centrale hydroélectrique suite à une action sur la charge. Il intègre donc le modèle global de la génératrice et son système d'excitation, le modèle dynamique de la partie hydraulique. Ainsi que le régulateur de vitesse.

La réussite de la mise en œuvre de cette centrale numérique passe par la maîtrise des phénomènes physiques ainsi que les équations mathématiques de modélisation du circuit hydraulique. C'est l'objet du paragraphe suivant.

3.2 Hypothèses de modélisations

La formulation des hypothèses tient compte des phénomènes physiques mis en jeu. Ces phénomènes sont exprimés par des équations mathématiques et leurs paramètres. Dans le cas des centrales, le fluide et la nature des conduites forcées retiennent particulièrement l'attention. Les hypothèses vont de la compressibilité de l'eau, l'élasticité des parois, la continuité du fluide, à la morphologie du circuit hydraulique.

3.2.1 Propriétés des fluides

Les caractéristiques de l'eau circulant dans la conduite forcée sont des éléments importants dans les modèles numériques des centrales. Ce sont :

3.2.1.1 *La compressibilité*

Un fluide est compressible si les changements de densité influencent considérablement sur les équations régissant son comportement. Le nombre de Mach (Ma) permet de déterminer la compressibilité du fluide. Pour $Ma<0.3$, le fluide est incompressible. Dans ce cas, la masse volumique de l'eau (ρ en Kg/m^3) est constante dans les équations. C'est le cas de l'eau. Pour des circuits hydrauliques comportant des conduites forcées de petites longueurs, cette hypothèse est très valable. Il y'a en effet une très faible probabilité de changement de la masse volumique d'eau entre l'entrée et la sortie de la conduite forcée.

3.2.1.2 *La viscosité*

- Un fluide est dit visqueux lorsque les frottements du fluide ont des effets significatifs sur les solutions des équations de ce dernier. Dans ce cas, de façon pratique, la vitesse n'est pas constante en tout point de l'écoulement. La température influence considérablement la viscosité du fluide. On distingue

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

deux cas :Tableau 3-1 présente la viscosité dynamique de l'eau pour différentes températures.

Tableau 3-1: Quelques cas de viscosité dynamique de l'eau

Corps	Température ^{0}C	Viscosité en Pa.s
eau	0	1.793×10^{-3}
	20	1.002×10^{-3}
	50	0.5470×10^{-3}
	100	0.2818×10^{-3}

- La viscosité cinématique

À partir de la viscosité (3.4), on définit l'écoulement. On distingue principalement trois types d'écoulement définis par rapport au nombre de Reynolds (3.5). L'eau est un liquide visqueux.

$$v = \frac{\mu}{\rho_f} \tag{3.4}$$

$$\Re = \frac{\rho_f V_i D}{\mu} \tag{3.5}$$

v est la viscosité cinématique ($en\ stockes$), $\Re$ est le nombre de Reynolds, ρ_f est la masse volumique du fluide considéré (Kg/m^3), V_i .est la vitesse moyenne d'écoulement du fluide (m/s).

La classification en fonction du nombre de Reynolds est la suivante :

$$\Re < 2000 \Rightarrow \textit{Écoulement laminaire}$$
$$2000 < \Re < 100\ 000 \Rightarrow \textit{Écoulement turbulent lisse}$$
$$100000 < \Re \Rightarrow \textit{Écoulement turbulent}$$

L'eau peut se situer dans n'importe lequel des cas en fonction des paramètres de la formule de Reynolds.

3.2.2 Éléments caractéristiques de la conduite forcée

3.2.2.1 *Constante de temps de l'eau*

C'est le temps mis par l'eau pour aller de la valeur nulle au débit nominal dans la conduite forcée. Il se calcule selon l'équation (3.6).

$$T_w = \frac{LQ_0}{gAH_0} \tag{3.6}$$

L'indice «o» indique la position de fonctionnement stable. L.est la longueur de la conduite forcée (m).

3.2.2.2 *Les pertes de charge dans une conduite forcée*

Les pertes de charge dans les conduites forcées provoquent une perte de puissance hydraulique. Ces pertes sont de deux types à savoir : ***(i)*** les pertes de charge singulière (3.7) dues aux coudes, les variations de section, aux soupapes, clapets, etc. (***ii)*** les pertes de charge régulières causées par la viscosité du fluide (3.8).

$$Hs = -Ks\frac{V_{pe}^2}{2} \tag{3.7}$$

$$Hr = -\lambda\frac{LV_{pe}^2}{2D} \tag{3.8}$$

K_s.est le coefficient de perte de charge régulière, V_{pe}.est la vitesse dans la plus petite section ou à la sortie de la singularité (m/s), H_s.est la perte de charge (J/Kg), H_r.est la perte de charge régulière (J/Kg), λ est le coefficient de perte de charge singulière.

3.2.2.3 *Constante d'élasticité de la conduite forcée*

C'est le temps mis par une onde pour aller de la turbine jusqu'à la pression atmosphérique la plus proche en traversant la conduite.

$$T_e = \frac{L}{a} \tag{3.9}$$

3.2.2.4 *Impédance de la conduite forcée*

Comme défini dans [18] l'impédance caractéristique de la conduite forcée se calcule de la façon suivante :

$$Z_0 = \frac{Q_0}{H_0\sqrt{g\alpha}} \tag{3.10}$$

$$Z_0 = \frac{T_w}{T_e} \tag{3.11}$$

T_w.est la constante de temps de l'eau (s)

3.2.3 Les éléments caractéristiques d'une chambre d'équilibre

3.2.3.1 *La période naturelle de la chambre d'équilibre*

C'est la période des oscillations entre la chambre d'équilibre et la conduite forcée.

$$T_S = 2\pi\sqrt{\frac{A_S L_t}{A_t g}} \tag{3.12}$$

A_s.est la surface de la chambre d'équilibre (m^2), A_t. est la surface interne de la conduite de liaison (m^2), L_t. est la longueur de la conduite de liaison (m).

3.2.3.2 *Constante de stockage de la chambre d'équilibre*

Telle que définie dans [18] , la constante de stockage de la chambre d'équilibre se calcule de la façon suivante :

$$T_S = C_S = \frac{A_S H_{base}}{Q_{base}} \tag{3.13}$$

L'indice «*base*» indique la référence.

3.3 Conclusion

Ce chapitre a permis d'avoir une idée générale sur les modèles numériques des centrales. On y retrouve aussi quelques informations et formules utiles dans l'orientation des hypothèses lors de la modélisation du circuit hydraulique. Ces formules seront dans une certaine mesure exploitées dans l'élaboration des modèles au chapitre suivant.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION DES DIFFÉRENTS SOUS-ENSEMBLES

Il est question dans ce chapitre de développer les modèles numériques de chaque élément du simulateur, puis de chaque sous-ensemble. Il commence par un rappel des différents éléments à modéliser. Par la suite, les équations mathématiques et le développement des modèles sont présentés. Une présentation de l'élément à modéliser et une revue des modèles existants dans chaque cas permettent à la fois de situer le lecteur et de dégager les spécificités du modèle réalisé dans ce document. Pour chaque cas, les résultats sont soient confrontés à un modèle existant, soient ceux d'un modèle existant. Cette astuce permet de valider progressivement les modèles exposés dans ce travail.

Les sous-ensembles à modéliser sont résumés dans la Figure 2-7 du chapitre 2. Les modèles sont dérivés des équations physiques et des liaisons existantes entre les différents sous-systèmes. Ces sous-systèmes sont basés sur les équations fondamentales de l'hydraulique, de la mécanique et de l'électricité. L'organigramme de la Figure 1-5 présente la démarche et les critères déterminants pour l'atteinte de l'objectif final dans chaque cas. Les modèles présentés dans cette partie sont ceux:

- Du circuit hydraulique, dont la conduite forcée et la turbine
- De l'alternateur et son système d'excitation
- Du servomoteur et le dispositif de régulation de vitesse

4.1 Modélisation du circuit hydraulique

Ce circuit présenté à la Figure 4-1va du réservoir amont jusqu'à la sortie de la bâche spirale. Il est constitué du bassin amont, de la caisse au reniflard, les morceaux de conduites forcées et de la bâche spirale.

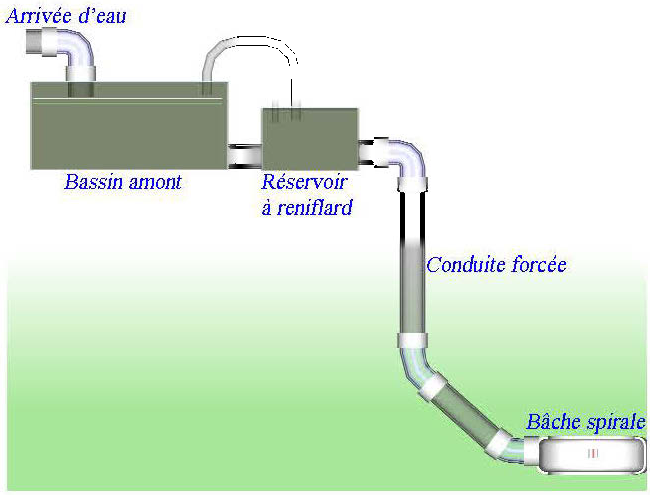


Figure 4-1 : Circuit hydraulique

La complexité et la variabilité de ce circuit imposent de choisir un processus de modélisation adéquat. La modélisation utilisant le modèle non linéaire de la conduite forcée [25], permet de scinder le circuit hydraulique en deux parties, de réaliser le modèle équivalent de chaque partie et d'effectuer leur mise en commun [25]. Pour y parvenir, on procède par l'analogie de modèle entre le circuit électrique et le circuit hydraulique.

Considérons les équations (3.2) de continuité et de mouvement (3.1) :

$$\frac{\delta H}{\delta x}+\frac{1}{gA}\frac{\delta Q}{\delta t}+\frac{fQ|Q|}{2gDA^2}=0 \tag{4.1}$$

$$\frac{\delta Q}{\delta x}+\frac{gA}{a^2}\frac{\delta H}{\delta t}=0 \tag{4.2}$$

$$Avec\ \ a=\sqrt{\frac{g}{\alpha}};\ \ \alpha=\rho g\left(\frac{1}{K_e}+\frac{D}{e_c E_y}\right)$$

La conversion en p.u de la hauteur H (hauteur) et du débit Q par rapport à la référence est donnée par :

$$h = \frac{H}{H_{base}} \quad et \quad q = \frac{Q}{Q_{base}} \tag{4.3}$$

Insérant (4.3) dans (4.1) on a :

$$\frac{\delta h}{\delta x} + \frac{Q_{base}}{gAH_{base}} \frac{\delta q}{\delta t} + \frac{fQ_{base}^2}{2gDA^2} q|q| = 0 \tag{4.4}$$

Considérant le modèle discret de la conduite forcée, on a :

$$\delta h = \Delta h; \;\; \delta x = \Delta x; \;\; \delta q = dq; \;\; \delta t = dt \tag{4.5}$$

(4.5) dans (4.4) donne :

$$\begin{aligned} \Delta h &= -\left(\frac{Q_{base}\Delta x}{gAH_{base}} \frac{dq}{dt} + \frac{\Delta x f Q_{base}^2}{2gDA^2} q|q| \right) \\ &= -\left(L\frac{dq}{dt} + Rq|q| \right) \end{aligned} \tag{4.6}$$

$$R = \frac{f\Delta x Q_{base}^2}{2gDA^2 H_{base}}; \; L = \frac{Q_0 \Delta x}{gH_{base}A} \tag{4.7}$$

Rapport-Gratuit.com

De la même manière, (4.3) et (4.7) dans (4.2)donne :

$$\frac{\delta q}{\delta x}+\frac{H_{base}gA}{Q_{base}a^2}\frac{\delta h}{\delta t}=0 \tag{4.8}$$

$$\Delta q=-\frac{H_{base}gA}{Q_{base}a^2}\frac{dh}{dt}=-C\frac{dh}{dt}\,Avec\ C=\frac{H_{base}gA\Delta x}{Q_{base}a^2} \tag{4.9}$$

Finalement,

$$\begin{cases}\Delta h=-\left(L\dfrac{dq}{dt}+Rq|q|\right)\\ \Delta q=-C\dfrac{dh}{dt}\end{cases} \tag{4.10}$$

$$R=\frac{fQ_{base}^2\Delta x}{2gDA^2H_{base}}\,;\ L=\frac{Q_{base}\Delta x}{gH_{base}A}\ ;\ C=\frac{H_{base}gA\Delta x}{Q_{base}a^2}$$

L'équation (4.10) conduit au modèle équivalent électrique de la Figure 4-2 [25]. L'équivalence électrique est présentée dans le Tableau 4-1.

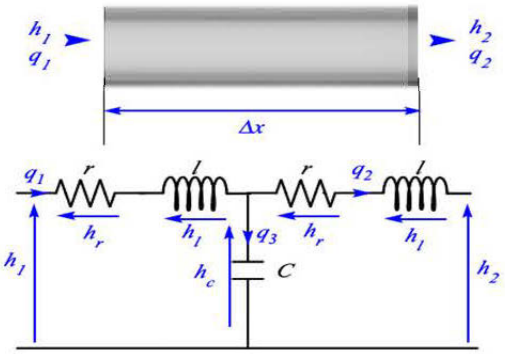


Figure 4-2 : Analogie de modèle de la conduite forcée

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les formules de calcul des grandeurs sont les suivantes:

$$h_r = rq_i;\ h_c = \frac{1}{C}\int q_3 dt;\ h_l = l\frac{dq_i}{dt}$$
$$r = \frac{R}{2} = \frac{fQ_{base}^2 \Delta x}{4gDA^2 H_{base}};\ l = \frac{L}{2} = \frac{Q_{base}\Delta x}{2gH_{base}A};\ \ C = \frac{H_{base} gA\Delta x}{Q_{base} a^2} \tag{4.11}$$

Dans le cadre d'un circuit ayant une chambre d'équilibre, le schéma équivalent électrique de la chambre d'équilibre est donné à la Figure 4-3 [25].

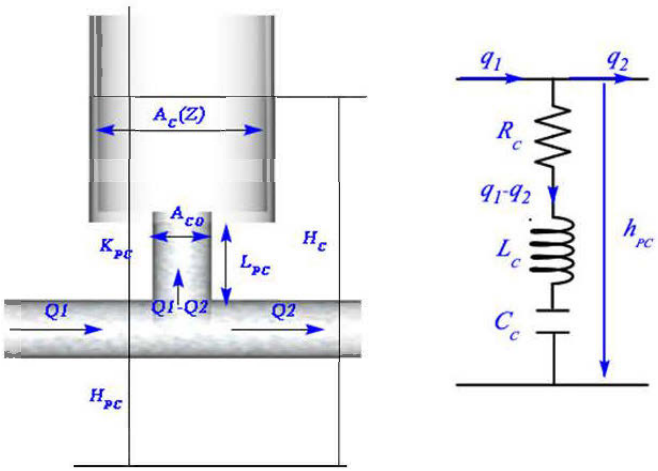


Figure 4-3 : Analogie de modèle de la chambre d'équilibre

Les formules de calcul des grandeurs sont les suivantes [25]:

$$C_C = \frac{A_c H_{base}}{Q_{base}};\ R_C = \frac{K_{PC}|Q_C|}{2gA_{C0}^2};\ \ L_C = \frac{L_{PC}}{gA_{C0}} \tag{4.12}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Le Tableau 4-1présente l'analogie entre les éléments électriques et hydrauliques.

Tableau 4-1 : Analogie de modèle hydraulique électrique

Élément	En électricité	En hydraulique
Courant	i : Intensité du courant	q: Débit d'écoulement dans la conduite
Tension	U : Différence de potentiel	h : Hauteur d'eau ou/et dénivellement
Résistance R	En électricité, elle provoque les pertes par effet joule dans le circuit. Elle provoque une chute de tension	elle provoque les pertes par frottement dans le circuit hydraulique. Elle provoque une chute de hauteur
Inductance l	Empêche les variations brusques du courant.	Empêche les variations brusques de débit. Elle est inversement proportionnelle à la section de la conduite forcée.
La capacité C	Empêche les variations brusques de tension	Empêche les variations brusques de hauteur (pression). Sa valeur est proportionnelle à la section de la conduite forcée ou de la chambre selon le cas.

Il est important de commenter ces équivalences afin de bien comprendre l'interprétation des résultats de cette partie, ainsi que l'influence des paramètres.

- En observant l'équivalence de modèle de la conduite forcée (Figure 4-2), on constate que la hauteur de la conduite à la sortie devrait être proche de celle à l'entrée. En effet, la résistance hydraulique équivalente de la formule (4.11) est généralement faible. Ce qui se justifie par le fait que les pertes par frottements sont faibles.
- D'autre part, la présence du condensateur dans le circuit de la conduite (Figure 4-2) forcée ne laisse pas circuler le fluide. Ce qui permet de conclure que le débit d'entrée (q_1) doit être égal au débit en sortie (q_2). Cependant, on devrait

s'attendre à un retard entre le débit d'entrée et de sortie. La grandeur de ce retard dépend de la vitesse de propagation des ondes dans le fluide.

- Dans le cas de la chambre d'équilibre, la capacité est beaucoup plus importante (4.12). Lorsque des opérations comme la fermeture brusque d'une vanne ou des directrices surviennent dans le circuit hydraulique, la pression augmente, ce qui a pour effet, une augmentation de la hauteur d'eau dans la chambre d'équilibre afin de stabiliser le système. Ce qui permet d'éviter des phénomènes non souhaitables tels que le coup de bélier. Par ailleurs, pour des circuits à prise d'eau longue, sa présence aiderait à faire échapper les bulbes dont la présence dans le fluide peut provoquer des baisses de pression indésirables. Cette baisse de pression est parfois la cause du phénomène de cavitation, destructeur des turbines. La résistance et l'inductance de la chambre d'équilibre sont dues à la section liant la conduite forcée et la chambre d'équilibre (Figure 4-3). Les paramètres de calcul de leur valeur en dépendent d'ailleurs (4.12). Très souvent, l'impact de ces derniers n'influence pas beaucoup le fonctionnement de la chambre d'équilibre. Ce qui ramène la chambre d'équilibre et la prise d'eau au circuit de la Figure 4-4 [28].

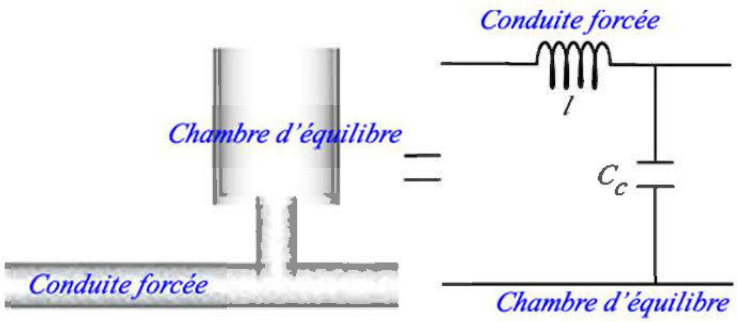


Figure 4-4 : Équivalence prise d'eau et chambre d'équilibre

Finalement, la mise en commun de la prise d'eau, de la chambre d'équilibre et de la conduite forcée ramène tout l'ensemble en une suite de résistances, d'inductances et de

condensateurs. Pour traiter un tel circuit, les lois de Kirchhoff rendent la tâche moins complexe et familière aux étudiants en génie électrique.

Dans la suite du travail, nous utiliserons les grandeurs hydrauliques dont le débit q et la hauteur h. La puissance (en p.u) au niveau de la turbine est le produit ces deux derniers. Cependant, le débit comme nous l'avons dit plus haut est lié à la section de la conduite et par conséquent à la position des directrices. Cet aspect est pris en compte lors de l'association de la turbine au circuit de la conduite forcée et de la prise d'eau.

4.1.1 Modélisation de la conduite forcée

La mise en œuvre du modèle de la conduite forcée est réalisée de façon graduelle.

- Dans un premier temps, le modèle d'une section de conduite forcée est présenté. Les résultats de simulation sont superposés au modèle non linéaire électrique du document [25].
- Par la suite, le modèle est subdivisé en plusieurs sections et les résultats sont de nouveau superposés au modèle de référence. Ce qui permet de valider la conformité du modèle proposé dans ce document avec la littérature qui stipule que, le résultat est meilleur lorsque la conduite est divisée en plusieurs morceaux [18, 25, 28]
- Enfin deux conduites forcées de diamètres différentes sont mises ensemble afin de démontrer la faisabilité d'un circuit de morphologie complexe. Le modèle de référence pour la validation croisé reste celui du document [25]

La Figure 4-5 présente un morceau de conduite forcée conformément à l'analogie présentée dans le paragraphe précédent et dans le Tableau 4-1.

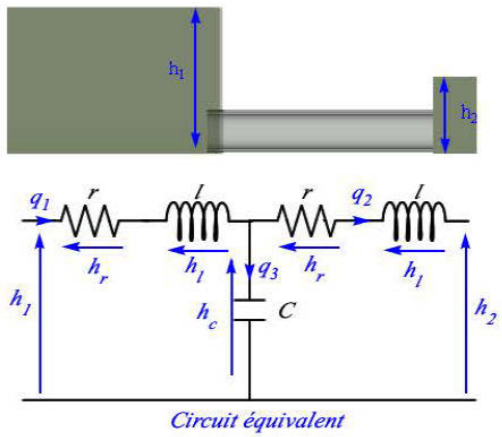


Figure 4-5 : Section de conduite forcée

Les équations de base régissant cette section de conduite forcée sont (3.1) et (3.2) [20, 25]. Ces équations sont ramenées au modèle électrique équivalent suivant la procédure présentée dans les équations (4.3) à (4.9). Les hypothèses sont les suivantes [20, 25] :

- Modèle non linéaire
- Propagation des ondes dans la conduite
- Influence de la chambre d'équilibre
- Compressibilité de l'eau
- Élasticité de la conduite forcée

Les lois de Kirchhoff appliquées au circuit électrique équivalent donnent :

$$h_1 = rq_1 + l\frac{dq_1}{dt} + \frac{1}{C}\int(q_1 - q_2)dt \tag{4.13}$$

$$h_2 = -rq_2 - l\frac{dq_2}{dt} + \frac{1}{C}\int(q_1 - q_2)dt \tag{4.14}$$

Soit $$x = \frac{1}{C}\int q_1 dt \Rightarrow q_1 = C\frac{dx}{dt} \;\; et \;\; y = \frac{1}{C}\int q_2 dt \Rightarrow q_2 = C\frac{dy}{dt} \tag{4.15}$$

En intégrant l'équation (4.15) dans les équations (4.13) et (4.15), on obtient :

$$h_1 = rC\frac{dx}{dt} + lC\frac{d^2x}{dt^2} + x - y \tag{4.16}$$

$$h_2 = -rC\frac{dy}{dt} - lC\frac{d^2y}{dt^2} + x - y \tag{4.17}$$

soit $$x_1 = \dot{x} \quad et \quad y_1 = \dot{y} \tag{4.18}$$

L'exploitation de (4.18) dans (4.16) et (4.17) conduit à :

$$\begin{cases} h_1 = rCx_1 + lC\dot{x}_1 + x - y \\ h_2 = -rCy_1 - lC\dot{y}_1 + x - y \end{cases} et \begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{h_1}{lC} + \frac{r}{l}x_1 - \frac{x}{lC} + \frac{y}{lC} \\ \dot{y}_1 = -\frac{h_2}{lC} - \frac{r}{l}y_1 + \frac{x}{lC} - \frac{y}{lC} \\ \dot{x} = x_1 \\ \dot{y} = y_1 \end{cases} \tag{4.19}$$

D'où

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{y} \\ \dot{y}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{lC} & -\frac{r}{l} & \frac{1}{lC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{lC} & 0 & -\frac{1}{lC} & -\frac{r}{l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ y \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{lC} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{lC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} \tag{4.20}$$

$$r = \frac{R}{2} = \frac{fQ_{base}^2 \Delta x}{4gDA^2 H_{base}}; \quad l = \frac{L}{2} = \frac{Q_{base}\Delta x}{2gH_{base}A}; \quad C = \frac{H_{base}gA\Delta x}{Q_{base}a^2} \tag{4.21}$$

Les variables observables étant les débits en entrée et en sortie, le modèle d'état de la section de conduite forcée est présenté à l'équation (4.22).

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{y} \\ \dot{y}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{lC} & \frac{r}{l} & \frac{1}{lC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{lC} & 0 & -\frac{1}{lC} & -\frac{r}{l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ y \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{lC} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{lC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ y \\ y_1 \end{pmatrix}$$

Simulation

Le modèle non linéaire électrique équivalent du document [25] avec lequel les simulations sont superposées est donné en Annexe 1. Les données utilisées du Tableau 4-2 [25] sont issues de la même référence.

Tableau 4-2 : Données de la conduite forcée

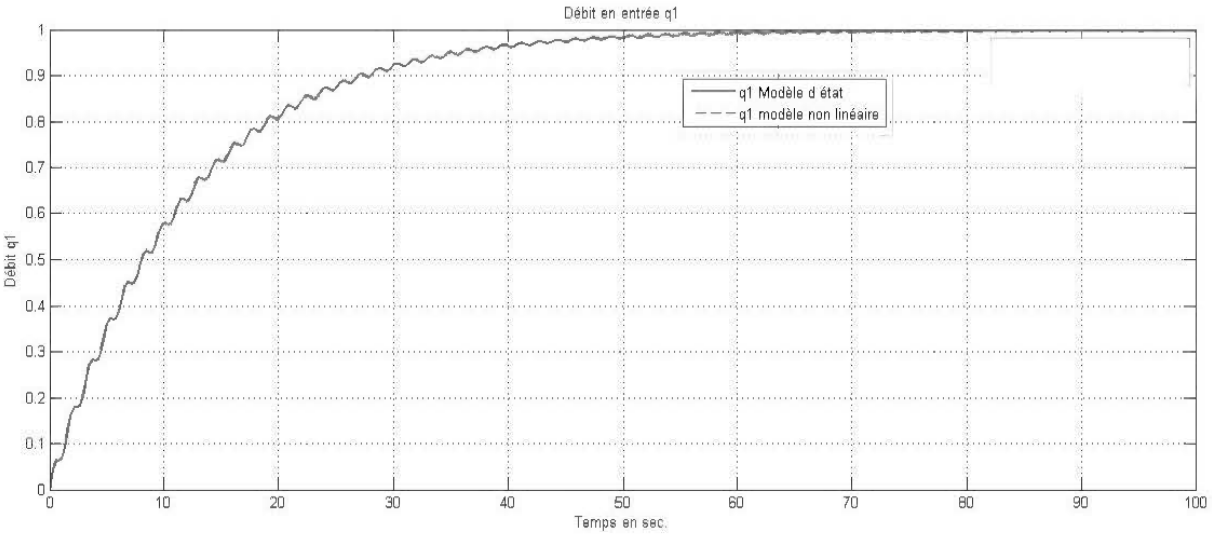
Élément	Données caractéristiques	Dimension
Élément1	Hauteur nominale $H_0 = H_1$	60 m
	Diamètre D	0.75 m
	Vitesse de propagation des ondes a	1100 m/s
	Coefficient de perte f	0.010
	Longueur L	550 m
	Débit Q_0	$5.6 m^3/s$

Les valeurs calculées et remplacées dans le modèle d'état (4.22) et non linéaire électrique équivalent sont les suivantes :

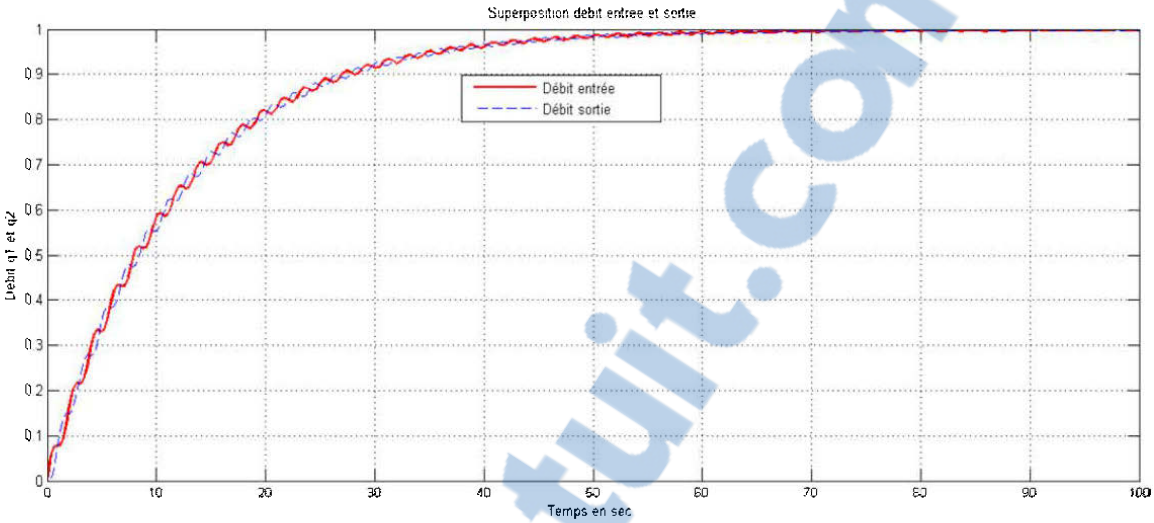
$$r = \frac{R}{2} = 0.5010 \qquad l = \frac{L}{2} = 5.9283 \qquad C = 0.0211$$

Les valeurs de commande sont h1=1 et h2=0. Cela suppose que la hauteur d'eau à l'entrée de la conduite forcée est constante de valeur 60m. La hauteur en sortie est en permanence nulle.

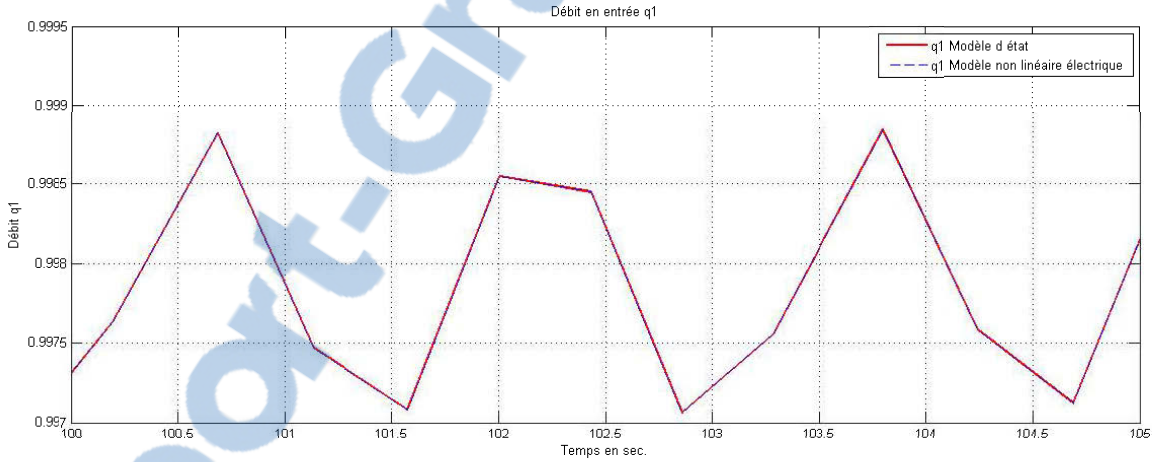
Résultats



a) Superposition des débits à l'entrée



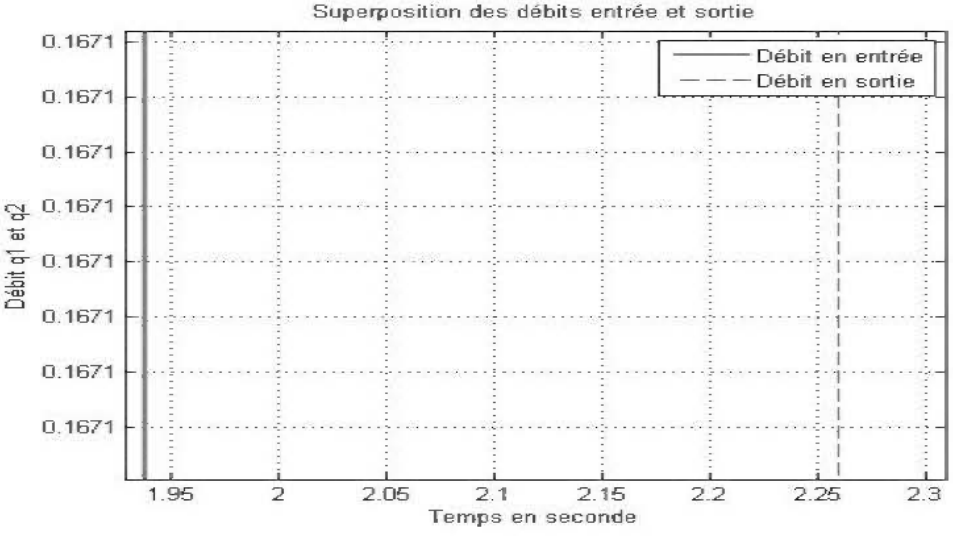
b) Superposition des débits en entrée et en sortie



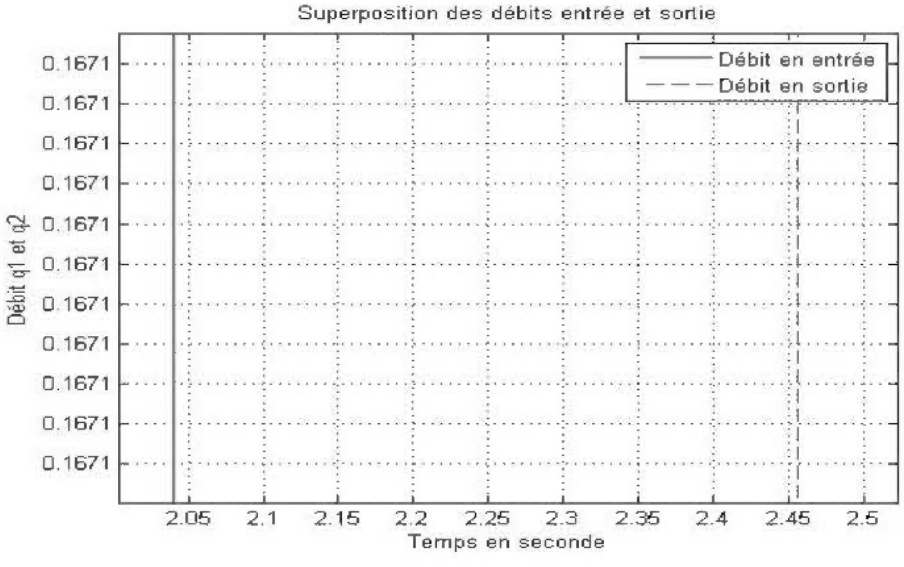
c) Zoom des débits à l'entrée

Figure 4-6 : Superposition des résultats des débits à l'entrée et à la sortie de la conduite forcée pour les deux modèles

Rapport-Gratuit.com



a) Pour a=1100



b) Pour a=900

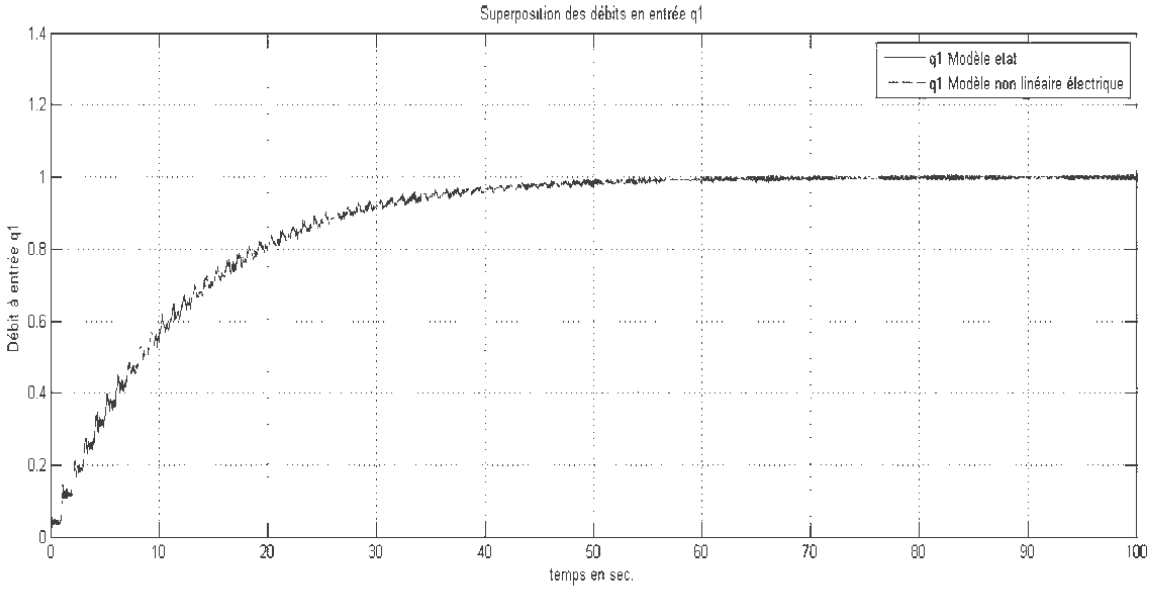
Figure 4-7 : Impact de la prise en compte de la propagation des ondes

Pendant l'intervalle de 0 à 100 secondes, le débit croit de la valeur nulle à sa valeur nominale en p.n (Figure 4-6-a). Le débit à l'entrée est égal au débit en sortie (Figure 4-6-b). Il est aisé de constater une parfaite concordance entre les deux modèles (Figure 4-6-c). Le modèle d'état est donc conforme à la littérature.

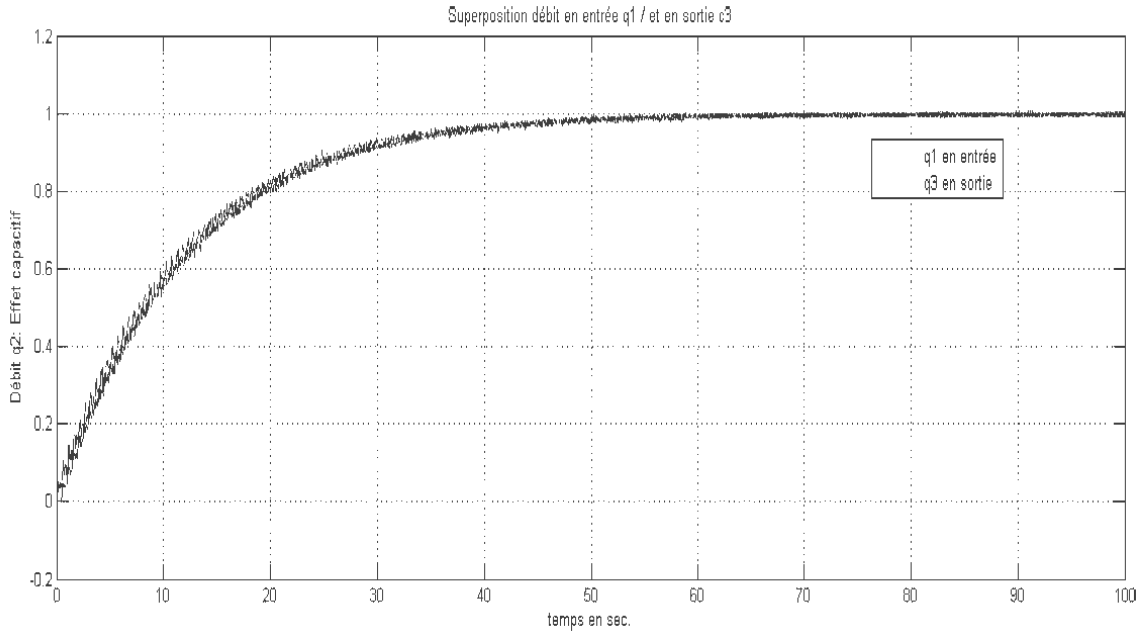
Par ailleurs, on peut remarquer que le débit en sortie commence avec un retard d'environ 0.3 s par rapport à celui d'entrée (Figure 4-7-a). Ce retard est certainement dû au temps de propagation des ondes dans la conduite. En effet, en diminuant la vitesse de propagation reconnue par « a » dans l'équation (4.21) (a passe de 1100 m/s à 900 m/s), l'écart entre les débits en entrée et en sortie passe de 0.3 s à 0.4 s environ (Figure 4-7-b). Cette variation de vitesse peut être causée par plusieurs facteurs, étant donné les paramètres intervenant dans son calcul ((3.3)). La prise en compte de la propagation des ondes dans la mise en œuvre de la turbine est faite dans le document [18] via la formule (3.9) et la modification de la structure de la turbine. Ces résultats sont donc conformes à la littérature.

Cependant, le résultat est plus proche de la réalité lorsque la conduite forcée est subdivisée en plusieurs éléments [18, 28]. Il est possible d'effectuer cette subdivision à partir du modèle d'état équivalent. Cette option est réalisée à partir du programme MATLAB en Annexe 2. Il faut simplement indiquer dans le programme, le nombre d'éléments souhaités. La superposition des résultats est effectuée avec l'équivalent électrique dont la figure est présentée en Annexe 2. Pour réaliser la simulation, les données sont les mêmes que celles du Tableau 4-2. La conduite forcée est divisée dans ce cas en treize éléments. Les résultats superposés représentent le débit à l'entrée et à la sortie de la conduite forcée. Les conditions de simulation sont aussi identiques à la différence de la subdivision de la conduite.

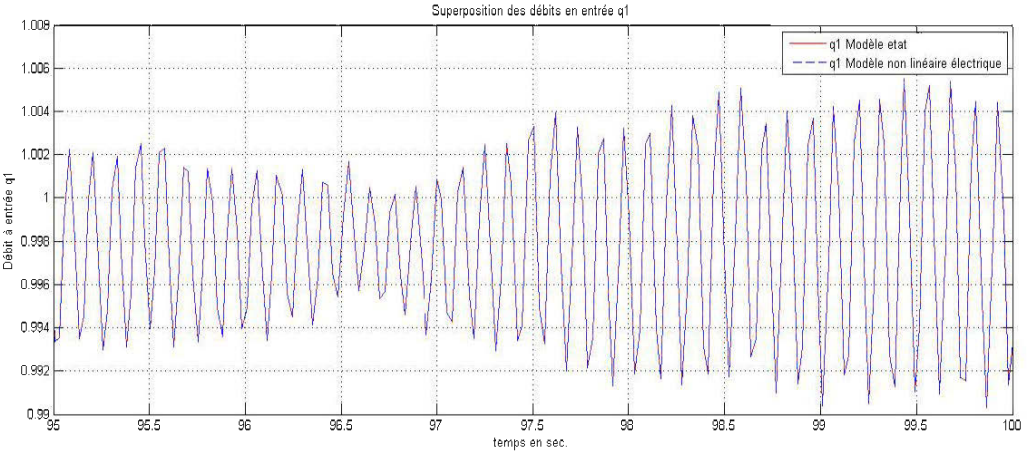
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



a) Débits en entrée pour les deux modèles



b) Débits en entrée et en sortie



c) Zoom débits en entrée pour les deux modèles

Figure 4-8 : Résultats de la division du modèle de la conduite en 13 éléments

Les résultats restent concordants et similaires (Figure 4-8). Ils démontrent la possibilité de subdivision de la conduite forcée en plusieurs sections comme mentionnée dans la littérature. Cependant, un autre avantage de ce modèle réside dans la mise en commun de deux sections de diamètres différents. La Figure 4-9 représente le système de conduite analysé par Chaudhry et reprit dans l'article [25].

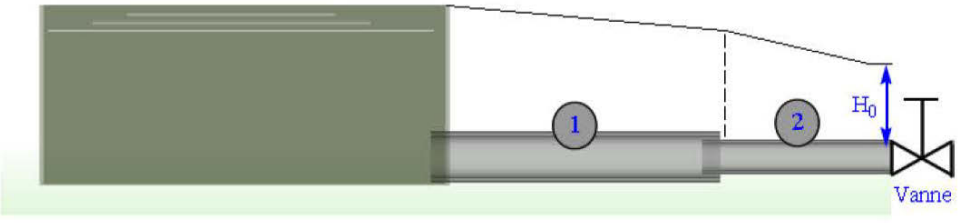


Figure 4-9 : Système de tuyauterie

Dans certains cas, les conduites forcées sont de diamètres différents. L'opération suivante consiste à mettre ensemble deux conduites forcées de diamètres différents (Figure 4-9).Le schéma équivalent des conduits 1 et 2 mis ensemble est donné à la figure suivante.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

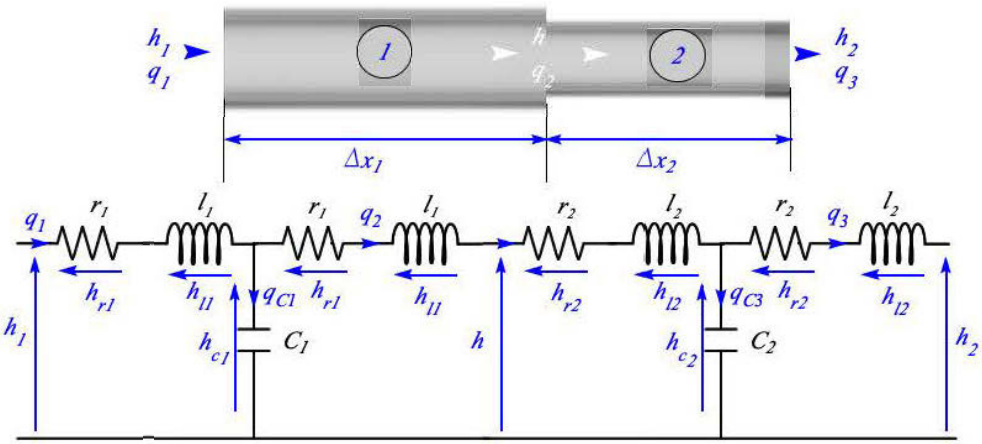


Figure 4-10 : double conduite

Les équations obtenues à partir de ce circuit sont les suivantes :

$$h_1 = r_1 q_1 + l_1 \frac{dq_1}{dt} + \frac{1}{C_1}\int (q_1 - q_2)dt \tag{4.23}$$

$$h_{C1} = \frac{1}{C_1}\int (q_1 - q_2)dt = k_1 \frac{dq_2}{dt} + k_2 q_2 + \frac{1}{C_2}\int (q_2 - q_3)dt$$

$$h_{C2} = \frac{1}{C_2}\int (q_2 - q_3)dt = -k_1 \frac{dq_2}{dt} - k_2 q_2 + \frac{1}{C_1}\int (q_1 - q_2)dt \tag{4.24}$$

$$avec\ k_1 = l_1 + l_2\ ;\ k_2 = r_1 + r_2$$

$$h_2 = -r_2 q_3 - l_2 \frac{dq_3}{dt} + \frac{1}{C_2}\int (q_2 - q_3)dt \tag{4.25}$$

Posons

$$\begin{cases} \int q_1 dt = x \\ \int q_2 dt = y \\ \int q_3 dt = z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_1 = \dot{x} = x_1 \\ q_2 = \dot{y} = y_1 \\ q_3 = \dot{z} = z_1 \end{cases} \tag{4.26}$$

En remplaçant (4.26) dans les équations (4.23) à (4.25), on obtient (4.27) à (4.29).

$$h_1 = r_1 x_1 + l_1 \dot{x}_1 + \frac{1}{C_1}(x - y) \tag{4.27}$$

$$\frac{1}{C_1}(x - y) = k_1 \dot{y}_1 + k_2 y_1 + \frac{1}{C_2}(y - z) \tag{4.28}$$

$$h_2 = -r_2 z_1 - l_2 \dot{z}_1 + \frac{1}{C_2}(y - z) \tag{4.29}$$

En ordonnant ces équations, on obtient (4.30) et (4.31) :

$$\begin{cases} \dot{x} = x_1 \\ \dot{x}_1 = \dfrac{h_1}{l_1} - \dfrac{1}{C_1 l_1}(x - y) - \dfrac{r_1}{l_1} x_1 \\ \dot{y} = y_1 \\ \dot{y}_1 = \dfrac{1}{C_1 k_1}(x - y) - \dfrac{k_2}{k_1} y_1 - \dfrac{1}{C_2 k_1}(y - z) \\ \dot{z} = z_1 \\ \dot{z}_1 = -\dfrac{h_2}{l_2} + \dfrac{1}{C_2 l_2}(y - z) - \dfrac{r_2}{l_2} z_1 \end{cases} \tag{4.30}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{y} \\ \dot{y}_1 \\ \dot{z} \\ \dot{z}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\dfrac{1}{l_1 C_1} & -\dfrac{r_1}{l_1} & \dfrac{1}{l_1 C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dfrac{1}{k_1 C_1} & 0 & -\dfrac{1}{k_1 C_2} - \dfrac{1}{k_2 C_2} & -\dfrac{k_2}{k_1} & \dfrac{1}{k_1 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{l_2 C_2} & 0 & -\dfrac{1}{l_2 C_2} & -\dfrac{r_2}{l_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ y \\ y_1 \\ z \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \dfrac{1}{l_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{1}{l_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} \tag{4.31}$$

Afin d'observer les grandeurs, q_1 *et* q_3 on écrit l'équation (4.32).

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ y \\ y_1 \\ z \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} \tag{4.32}$$

L'équivalent électrique [25] permettant les simulations est représenté à l'annexe 3.

Les données de simulation sont contenues dans le Tableau 4-3 [25].

Tableau 4-3 : Données du circuit des deux conduites forcées

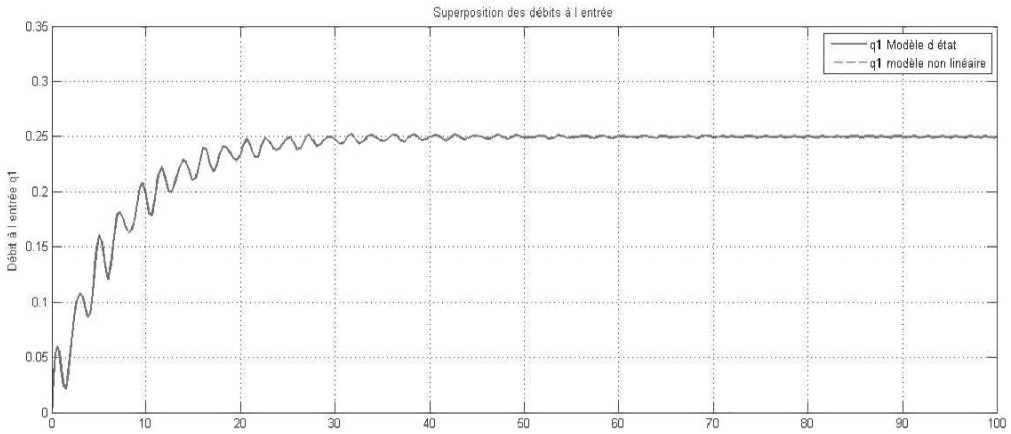
Grandeur	Élément 1	Élément 2
Hauteur nominale H_0	60 m	-
Diamètre D	0.75m	0.60m
Vitesse de propagation des ondes a	1100m/s	900m/s
Coefficient de perte f	0.010	0.012
Longueur	550m	450m

Partant de ces données et conformément aux équations (4.21), les grandeurs calculées sont les suivantes.

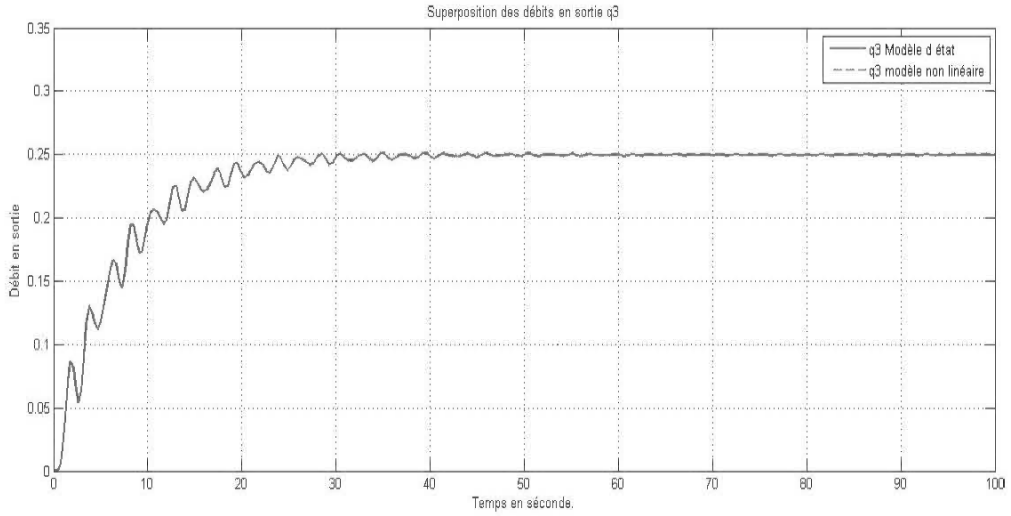
$$l_1 = 1.0586; \quad l_2 = 1.3534; \quad r_1 = 0.0160; \quad r_2 = 0.0479$$
$$k_2 = r_1 + r_2 = 0.0638; \qquad k_1 = l_1 + l_2 = 2.4120$$

Les valeurs de commande sont h1=1 et h2=0. Cela suppose que la hauteur d'eau à l'entrée de la conduite forcée est constante de valeur h=60m. La hauteur en sortie est nulle et la conduite forcée est ouverte. Ces données sont remplacées dans le modèle non

linéaire de la conduite forcée et le modèle d'état. Les résultats de la simulation sont présentés à la Figure 4-11.



a) débit en entrée



b) Débit en sortie

Figure 4-11 : Débits dans les deux conduites forcées

La deuxième conduite forcée est de diamètre réduit. Ce qui provoque la diminution du débit circulant dans le circuit (Figure 4-11), comparativement au cas précédent avec une conduite de diamètre plus grand (Figure 4-6). Par ailleurs, le débit final atteint plus rapidement la valeur finale (40 s). On remarque une parfaite concordance entre le modèle non linéaire (équivalent électrique) et le modèle d'état. Il est donc possible de

réaliser le modèle d'état des circuits complexes ou non. Le modèle d'état de la conduite forcée est de ce fait exploitable pour la réalisation du simulateur. Il permettra de tenir compte de tous les avantages et hypothèses qui en découlent.

4.1.2 Modélisation de la turbine

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

Ainsi, partant des résultats du modèle idéal, nous justifions le comportement général des turbines lors de l'ouverture ou de la fermeture des vannes. Les limites de ce modèle conduisent à la présentation des autres modèles, particulièrement le modèle non linéaire simplifié. La conformité des résultats du modèle et l'impact des hypothèses sont basés sur modèle idéal. Le modèle utilisé pour le simulateur est basé sur le modèle non linéaire simplifié. Ce dernier est utilisé pour la validation du modèle final adopté dans ce document.

Dans tous les cas, l'objectif recherché lors de la modélisation de la turbine est d'exprimer avec fidélité, la puissance fournie quelle que soit la forme ou la composition du circuit hydraulique, ainsi que des variations y intervenant. Les variations dans le circuit hydraulique (régime transitoire : mise en marche, délestage, enclenchement de charge, court-circuit) causées par la charge entrainent la réaction du dispositif de vannage via son régulateur de vitesse. Il est donc question de pouvoir exprimer instantanément la puissance disponible, quelles que soient les modifications de la puissance électrique au niveau de la charge. La puissance à la sortie de la turbine tient généralement compte de plusieurs éléments [18] définis dans le chapitre précédent. Ce sont :

- Les pertes de charge qui sont proportionnelles au carré du débit (Vitesse) et la friction des parois des conduites forcées (rugosité de la conduite forcée)
- Les pertes dues à la friction du moteur (frottements)
- La nature du fluide et ses caractéristiques (compressibilité ou non, viscosité ou non)
- De la nature des conduites forcées (rigides ou non)

L'orientation des hypothèses contribue à simplifier ou non le modèle final.

4.1.2.1 *Les différents modèles de la turbine Francis*

Le modèle simplifié des turbines est utilisé dans les programmes de simulation des réseaux d'énergie électrique [23]. Cependant, il existe une variété de modèles.

En particulier pour la turbine Francis, une présentation non exhaustive des modèles rencontrés est faite à la Figure 4-12.

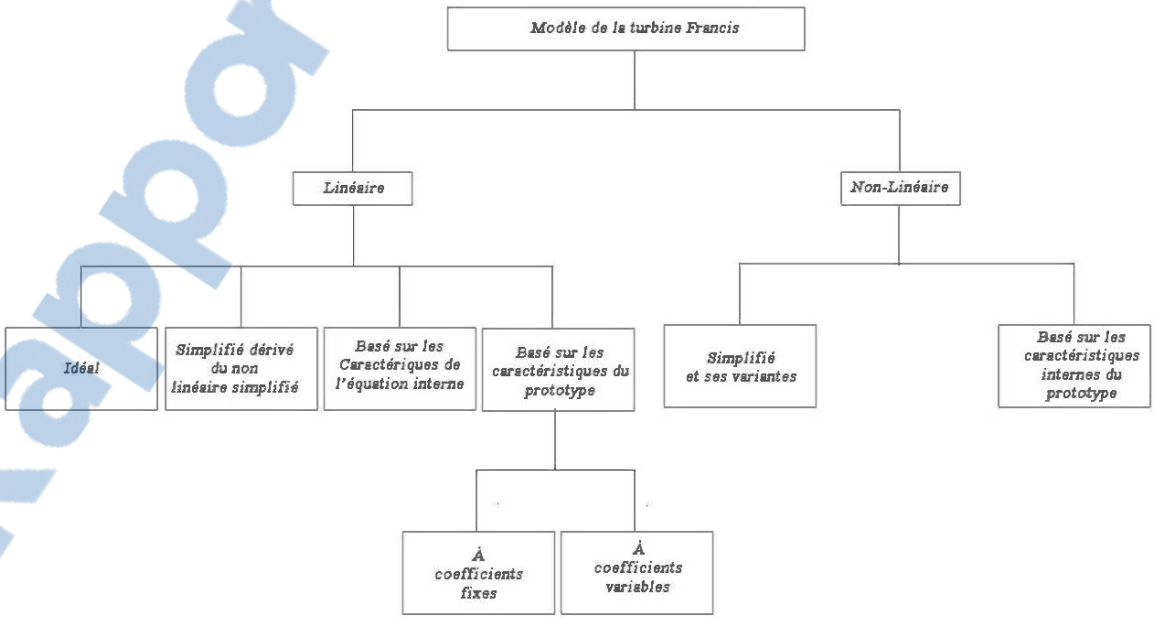


Figure 4-12 : Les différents modèles de la turbine Francis

Rapport-Gratuit.com

De façon générale, le modèle peut être linéaire ou non, simplifié ou non. Les équations régissant les modèles expriment le débit et/ou le couple (puissance en pu) en sortie ((4.33) et (4.34)) en fonction de trois paramètres dont : la vitesse de rotation, la pression et la position des directrices.

$$T = T(G, H, \omega) \tag{4.33}$$

$$Q = Q(G, H, \omega) \tag{4.34}$$

i. Le modèle idéal

Le modèle idéal est basé sur un certain nombre d'hypothèses [12]. Ces hypothèses utilisées pour la représentation de la turbine et la colonne d'eau dans l'étude de la stabilité sont les suivantes :

- Le circuit hydraulique est le plus simple possible et sa résistance est négligeable
- La conduite forcée est rigide
- L'eau est incompressible
- La vitesse du fluide est directement proportionnelle à l'ouverture du système de vannage et à la racine carrée de la hauteur de chute
- La puissance en sortie de la turbine est proportionnelle à la hauteur de la chute

Les équations tenant compte de ces hypothèses et définissant le modèle idéal sont la vitesse et la puissance (4.35) et la seconde loi de Newton définissant l'accélération de la colonne d'eau (4.36):

$$\begin{cases} V = K_V G\sqrt{h} \\ P_m = K_p HV \end{cases} \tag{4.35}$$

$$\rho LA\frac{d\Delta V}{dt} = -A\rho g\Delta H \tag{4.36}$$

$LA\rho$ *représente la masse d'eau dans la conduite*

Soit le point de fonctionnement défini par (4.37). La linéarisation de l'équation (4.35) autour de ce point de fonctionnement conduit aux équations suivantes :

$$V_o = K_V G_o\sqrt{H_o} \text{ et } P_o = K_p H_o V_o \tag{4.37}$$

$$\Delta\overline{V} = \Delta\overline{G} + \frac{\Delta\overline{H}}{2} \Rightarrow \Delta\overline{H} = 2\left(\Delta\overline{V} - \Delta\overline{G}\right) \tag{4.38}$$

$$\Delta\overline{P}_m = \Delta\overline{V} + \Delta\overline{H} = 3\Delta\overline{V} - 2\Delta\overline{G} \tag{4.39}$$

En divisant l'équation de l'accélération (4.36) par $A\rho g H_o V_o$, on obtient :

$$T_w\frac{\delta\overline{V}}{\delta t} = -\Delta\overline{H} \tag{4.40}$$

$$T_w = \frac{LV_o}{gH_o} = \frac{LQ_o}{gAH_o} \tag{4.41}$$

Généralement, $0.5s \le T_w \le 4s$ en pleine charge [12].

Les équations (4.37) à (4.40) ramenées dans le domaine de Laplace permettent d'obtenir :

$$\frac{\Delta\overline{P}_m}{\Delta\overline{G}} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5T_w s} \tag{4.42}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

$$\frac{\Delta\overline{V}}{\Delta\overline{G}} = \frac{1}{1+\frac{1}{2}T_w s} \text{ et } \frac{\Delta\overline{H}}{\Delta\overline{G}} = \frac{-1.5T_w s}{1+\frac{1}{2}T_w s} \tag{4.43}$$

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

Simulation

La simulation consiste à générer une variation à l'entrée de la turbine. En pratique, cette variation correspond à une ouverture ou une fermeture des directrices. La fermeture est brusque pour une variation échelon. Elle est progressivement dans le cas d'une rampe. Les données de simulation sont celles du Tableau 4-4 [12]. Le schéma de simulation est donné en annexe 3. Il est important de noter que la fonction de transfert (4.42) présente une variation de puissance en fonction du débit d'entrée en P.U. L'expression de la constante de temps à l'équation (4.41) utilise les grandeurs en système international.

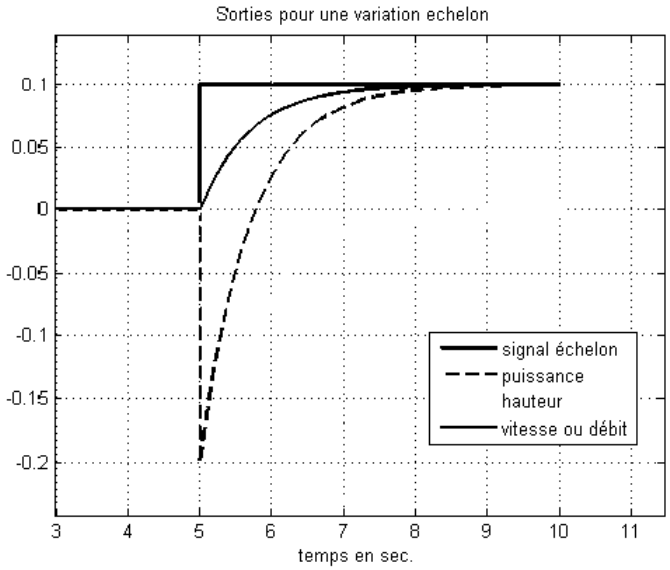
Tableau 4-4 : Données de simulation du modèle idéal de la turbine

Appareil	Domée	Valeur
Génératrice	Puissance apparente nominale	140 MVA
Conduite forcée	longueur	300 m
Centrale	Hauteur	165 m
	Section	11.15m^2
Vanne	Ouverture pour une nominale	0.94p.u
	Ouverture à vide	0.06p.u
Turbine	Puissance nominale	127.4 MW
Eau	Débit nominal	85 m^3/s

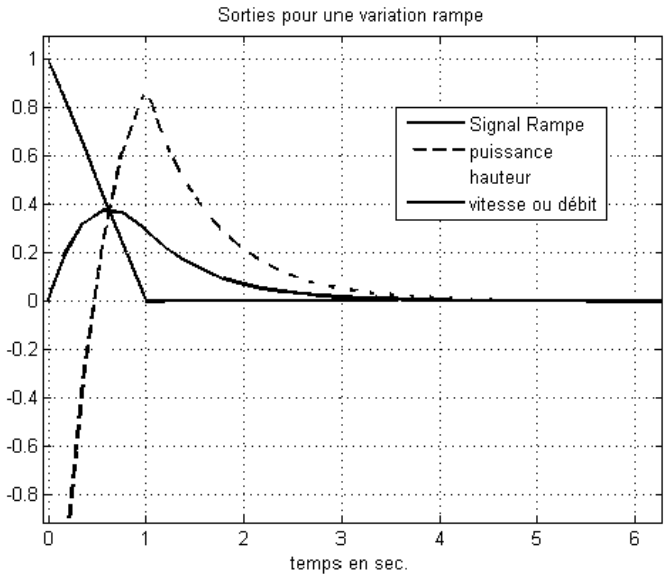
À partir de ces données, la constante de temps T_w calculée conformément à l'équation (4.41) est:

$$T_w = \frac{LV_o}{gH_o} = \frac{LQ_o}{gAH_o} = \frac{300 \times 85}{9.81 \times 165 \times 11.15} = 1.41s$$

Les fonctions de transfert (4.42) et (4.43) sont introduites dans MATLAB/Simulink. Les résultats d'une variation échelon en entrée sont présentés à la Figure 4-13 a, et ceux d'une rampe à la Figure 4-13 b.



a) Échelon



b) Rampe

Figure 4-13 : Comportement de la turbine idéale

Une action des directrices (ouverture ou fermeture) entraine une variation de puissance dans le sens contraire. Cette puissance va ensuite varier exponentiellement (croître ou décroître selon le cas), pour atteindre la nouvelle valeur stable suivant une constante de temps estimée à $\frac{T_w}{2}$ ($\Delta\overline{P}_m(t) = \left(1 - 3e^{-(2/T_w)t}\right)\Delta\overline{G}$). La variation initiale est de sens opposé à l'ouverture ou à la fermeture des directrices parce qu'elle n'entraine pas instantanément la variation de l'inertie de l'eau dans le sens souhaité. Il en résulte une baisse de pression pour l'ouverture et une augmentation pour la fermeture. Ce qui provoque une variation inverse de la puissance par rapport à l'action du système de vannage. Le débit et la hauteur varient dans le même sens que la puissance. Ce résultat est conforme au document [12]. Il est possible à partir du modèle idéal de déterminer les coefficients du modèle à coefficients constant [12].

Cependant, le modèle idéal et le modèle linéaire basé sur les caractéristiques à coefficients constants sont ceux qui ont été utilisés dans le passé. Ils sont adaptés pour

de faibles variations autour du point de fonctionnement. Ils sont inadéquats lorsque les variations de puissance ou de tension deviennent considérables [12].

ii. Le modèle non linéaire simplifié

Les modèles non linéaires permettent de réaliser des simulations pour de grandes variations de puissances ou de fréquences. Leur avantage principal est de toujours estimer la valeur la plus proche possible de la valeur réelle tout au long de la simulation. C'est le modèle approprié pour la simulation dynamique.

À la différence du modèle idéal, le modèle non linéaire simplifié prend en compte les pertes dans les parois de la conduite forcée. Ces pertes sont proportionnelles au carré du débit. Les pertes à vide sont considérées par la soustraction de la puissance à vide dans l'équation (4.44). De même, les pertes par frottement au niveau de la turbine sont prises en compte. La résistance hydraulique n'est donc plus négligeable.

Les équations régissant ce modèle sont:
D'une part pour la puissance et le débit:

$$\begin{cases} P_t = P - P_{AV} - D_{pt} G \Delta\omega = A_t \left(Q - Q_{AV}\right) H - D_{pt} G \Delta\omega \\ Q = G\sqrt{H} \end{cases} \tag{4.44}$$

$$A_t = 1/\left(G_{PL} - G_{AV}\right) \tag{4.45}$$

Le calcul de la puissance P_t disponible au niveau de la turbine, tient compte des pertes à vide et par frottement. A_t est un facteur de proportionnalité. Dans le cas de l'équation(4.45), il permet de passer de la position actuelle (dans la simulation) des directrices à la position réelle.

D'autre part, à partir des lois de la dynamique, le taux de variation du débit dans la conduite est :

$$\frac{dQ}{dt} = g\left(H_0 - H - H_{AV}\right) \tag{4.46}$$

La conversion en p.u est faite autour du point de fonctionnement nominal. Il s'agit de diviser les grandeurs par leur valeur de référence ou de base. Il est important de noter que ces dernières sont choisies arbitrairement. Toutefois, pour des raisons de simplification, il convient de choisir les valeurs nominales comme celles de référence [18]. La position des directrices étant convertie par le gain A_t. Les équations qui en résultent en p.u sont les suivantes:

$$(4.44) \Rightarrow \begin{cases} \overline{P}_t = \overline{P} - \overline{P}_{AV} = \overline{A}_t\left(q - q_{AV}\right)h - D_{pt}G\Delta\omega \\ q = G\sqrt{h} \end{cases} \tag{4.47}$$

$$(4.46) \Rightarrow \frac{dq}{dt} = \frac{\left(1 - h - h_{AV}\right)}{T_W} \tag{4.48}$$

$$Avec\ T_W = \frac{LQ_N}{gH_N A} \tag{4.49}$$

Dans certains documents [18], on choisit de convertir la position des directrices G en fonction de la puissance de la turbine (en MW) sur la base de la puissance apparente de la génératrice (MVA) et prenant en compte le gain de la turbine.

$$\overline{A}_t = \frac{Puissance\,de\,la\,turbine\left(MW\right)}{Puissance\,de\,la\,génératrice\left(MVA\right)h_N\left(q_{PL} - q_{Av}\right)} \tag{4.50}$$

$$en\ p.u\ q_{AV} = \overline{g}_{AV}\sqrt{h_0}\ \ avec\ h_0 = 1 \tag{4.51}$$

Dans ce modèle, la valeur de la constante de temps hydraulique T_W n'est plus liée uniquement à un point de fonctionnement, mais est unique à tout le système, et calculée par rapport au point de fonctionnement nominal de la turbine.

Les indices « $AV, t, N, PL, o, base$» désignent respectivement à vide, turbine, nominale, pleine charge, la position d'équilibre avant la variation et.la référence.

La mise des équations (4.47) à (4.51) sous forme de schéma exploitable dans Simulink est donnée à la Figure 4-14 [18].

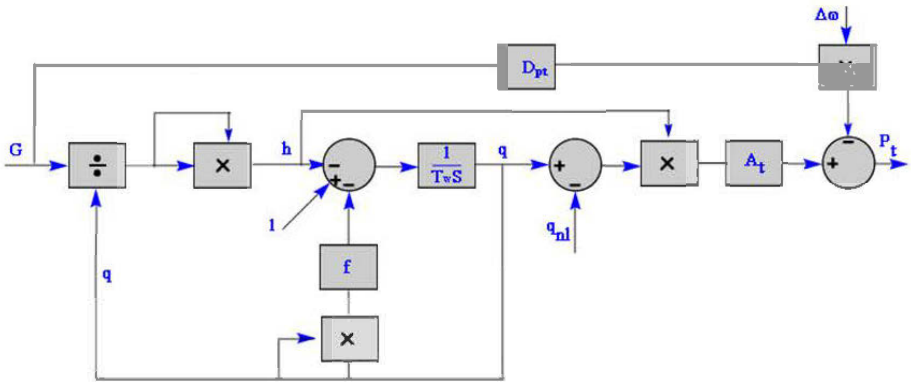


Figure 4-14 : Modèle non linéaire simplifié de la turbine hydraulique

Dans cette figure, D_{pt} représente le coefficient de frottement visqueux;

Il faut remarquer que dans certaines considérations, le débit (q en p.u) est remplacé par la vitesse (V en p.u). Les deux grandeurs étant équivalentes en p.u

En effet,

$$Q = \frac{U_o}{t} = A\frac{L}{t} = A.V \tag{4.52}$$

$$V = K_V G\sqrt{H} \Rightarrow Q = K_V AG\sqrt{H} = K_u G\sqrt{H} \tag{4.53}$$

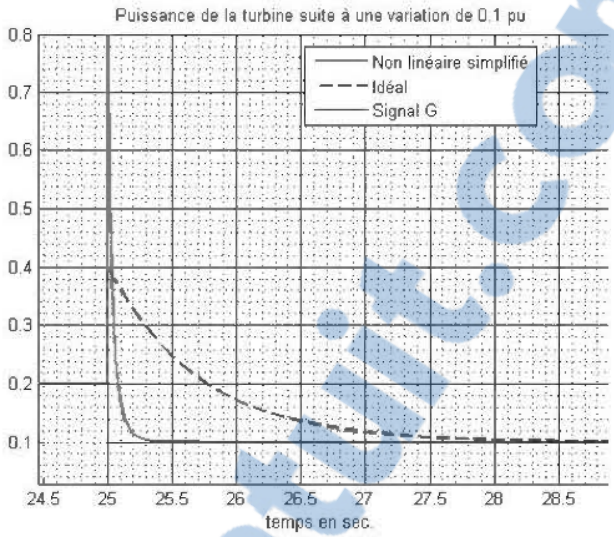
$$q = \frac{G\sqrt{H}}{G_{base}\sqrt{H_{base}}} = \bar{V}\,(p.u) \tag{4.54}$$

U : Volume d'eau s'écoulant dans la conduite.

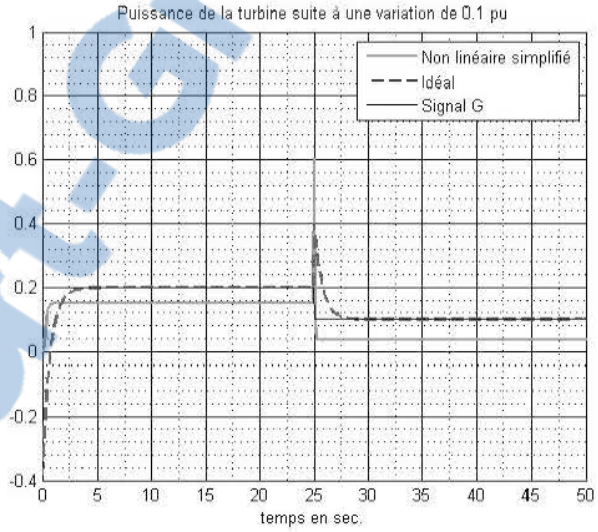
Simulation

La simulation de ce modèle est faite avec les données du Tableau 4-4. L'opération de simulation est identique à celui du modèle idéal. La structure utilisée dans Simulink pour cette simulation est donnée en Annexe 4. Étant donné qu'il est question de présenter uniquement la turbine, on ne tient pas compte de la vitesse de rotation. Les pertes liées à cette dernière ne sont donc pas prises en compte.

Les résultats sont superposés avec ceux du modèle idéal. Dans l'optique de s'assurer de l'exactitude des résultats avec le modèle idéal, dans une première considération, les pertes sont supposées nulles (Figure 4-15-a). Pour cela, le coefficient de frottement dans la conduite forcée, les pertes à vide sont nulles. Le facteur de conversion At est égal à l'unité. Par la suite, les pertes à vide et par frottement sont prises en compte. Dans ce cas, f=0.01 est une valeur typique des coefficients de frottement de Darcy – Weisbach prise dans [25] pour une conduite forcée. Le facteur At est calculé conformément à l'équation (4.45). Les pertes dues à l'amortissement de la turbine restent nulles étant donné que la vitesse n'intervient pas dans cette simulation (Figure 4-15-b).



a) Sans considérer les pertes à vide



b) En considérant les pertes et autre

Figure 4-15 : Puissance pour une variation de la vanne de 0.1p.u du modèle non linéaire simplifié

- Le modèle idéal est très proche du modèle non linéaire simplifié lorsque le facteur de gain At, le coefficient de frottement f, et les pertes à vide exprimées par le débit q_{nl} ne sont pas pris en considération (Figure 4-15 a). Lorsque ces derniers sont pris en compte, on constate une différence quantitative au niveau

Rapport-Gratuit.com

des deux courbes, cette différence est essentiellement due aux pertes à vide (le coefficient de frottement f étant assez faible)

- Cependant, il faut remarquer que le débit obtenu avec le modèle non linéaire simplifié atteint plus rapidement la nouvelle position d'équilibre
- Le pic atteint lors de la variation de puissance est plus poussé avec le modèle non linéaire. Conformément au document [18], les modèles linéaires sont moins précis lorsqu'il survient des changements d'écoulement dans la conduite forcée

iii. Le modèle non linéaire basé sur les caractéristiques internes du prototype

Ce modèle fait appel aux caractéristiques internes des turbines hydrauliques.

$$\begin{cases} H = \dfrac{\omega}{g}\left[\left(\dfrac{\cot\alpha}{2\pi b_o} + r\dfrac{\cot\beta}{F}\right)Q - \omega r^2\right] \\ T = \rho\left[\left(\dfrac{\cot\alpha}{2\pi b_o} + r\dfrac{\cot\beta}{F}\right)Q - \omega r^2\right] \end{cases} \tag{4.55}$$

La méthode de détermination des paramètres de ce modèle ainsi que la nomenclature sont présentées dans le document [23].

iv. Le modèle linéaire basé sur les caractéristiques internes du prototype

Les équations de ce modèle permettant d'obtenir les valeurs du couple et du débit s'expriment, par :

$$\begin{cases} T = \dfrac{\delta T}{\delta y} y + \dfrac{\delta T}{\delta x} x + \dfrac{\delta T}{\delta h} h = e_{Ty} y + e_{T\omega} x + e_{Th} h \\ q = \dfrac{\delta q}{\delta y} y + \dfrac{\delta q}{\delta x} x + \dfrac{\delta q}{\delta h} h = e_{qy} y + e_{q\omega} x + e_{qh} h \end{cases} \tag{4.56}$$

Il s'agit en fait de la linéarisation du couple et du débit. Les facteurs ou dérivées partielles sont des grandeurs à déterminer en fonction des caractéristiques du prototype. Cette procédure découle de la loi des similitudes selon laquelle, toutes les turbines ayant la même forme géométrique, mais de grandeurs différentes, présentent un même comportement. Quelques approches utilisées pour le calcul des coefficients sont :

- Déterminer les coefficients fixes de la turbine en fonction du prototype [12]
- Évaluer par interpolation à partir des données du « Hill diagram », [22, 29]
- Etc.

Malgré la linéarisation (4.56) qui constitue la base de cette méthode, elle est très adaptée et utilisée dans les simulations dynamiques. En effet, le fait de déterminer à chaque variation les valeurs des coefficients lui confère un caractère dynamique et rend la méthode non linéaire. Les différences rencontrées dans cette méthode résident sur les procédés mathématiques utilisés pour réaliser l'interpolation lors de la détermination des paramètres. Il en existe plusieurs variantes.

v. Modèle de la turbine Francis pour le simulateur

L'objectif est d'exploiter un modèle simple permettant de compenser le grand nombre de besoins recherchés par les programmes de simulation [18]. Ces besoins sont entre autres :

- La modélisation des systèmes ayant un circuit hydraulique à morphologie complexe

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- L'exploitation du modèle pour la simulation des opérations de délestage, d'impact ou d'enclenchement de charge, et les effets du coup de bélier
- La simulation des systèmes isolés
- La restructuration du système suite à une défaillance
- La réalisation des simulations à périodes transitoires longues

Le modèle idéal est limité vu les hypothèses simplificatrices qui le régissent, et surtout qu'il ne permet pas les simulations pour les grandes variations [12]. Il faut donc se référer aux modèles non linéaires. Étant donné que le modèle de la conduite forcée est déjà réalisé, le modèle doit permettre de dissocier la turbine de ce dernier. C'est le cas du modèle non linéaire simplifié. La turbine est considérée comme une valve. Il est possible de joindre le modèle d'état de la conduite forcée et celui de la turbine en s'inspirant du modèle non linéaire simplifié. Cette réalisation permet d'apporter d'importants atouts au modèle tel que nous allons expliquer dans la suite.

En effet, dans les modèles simplifiés et linéaires, les deux équations de vitesse de l'eau dans la conduite et de puissance de la turbine sont quasi identiques (4.35). La différence est observée au niveau de la prise en compte des pertes (à vide et pendant le fonctionnement), et de l'équation de l'accélération de la colonne d'eau ((4.36) et(4.46)).

Pour l'approche que nous adoptons, les deux équations de vitesse et de puissance mécanique de la turbine sont conservées (4.47). Les équations qui régissent la conduite forcée sont soumises aux hypothèses suivantes [25]:

- La résistance hydraulique est non négligeable
- La conduite forcée est élastique et l'eau est compressible
- On prend en compte la propagation des ondes dans le fluide ainsi que l'effet de la chambre d'équilibre

Les équations de mouvement et de continuité [25] permettent de ce fait d'exprimer le fonctionnement de la conduite forcée.

La turbine proposée est donc régie par les équations suivantes :

- Celle de la vitesse de l'eau dans la turbine (4.44)
- Celle de la puissance mécanique de la turbine (4.44)
- L'équation de mouvement (3.1)
- L'équation de continuité (3.2)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

La combinaison de ces équations revient à remplacer dans le modèle non linéaire simplifié, la fonction de transfert de l'accélération de la colonne d'eau par le modèle d'état équivalent de la conduite forcée. Ce qui peut aussi être remplacé par la conduite et tous ses constituants (chambre d'équilibre), selon sa morphologie.

Les hypothèses ayant servi à l'élaboration de chacune des parties deviennent par conséquent applicables au système global. Ce sont :

- La vitesse du fluide est directement proportionnelle à l'ouverture du système de vannage et à la racine carrée de la hauteur de la chute
- La puissance à la sortie de la turbine est proportionnelle à la hauteur de la chute
- Les pertes à vide, par frottement dans les parois et sur la turbine sont prises en compte
- La résistance hydraulique est non négligeable
- La conduite forcée est élastique et l'eau est compressible
- On tient compte de la propagation des ondes dans l'eau

La représentation de la turbine est donc celle de la Figure 4-16.

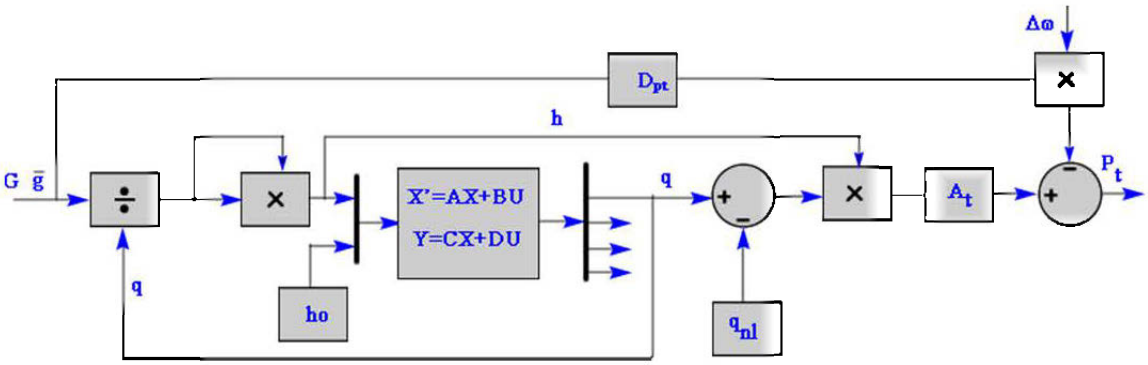
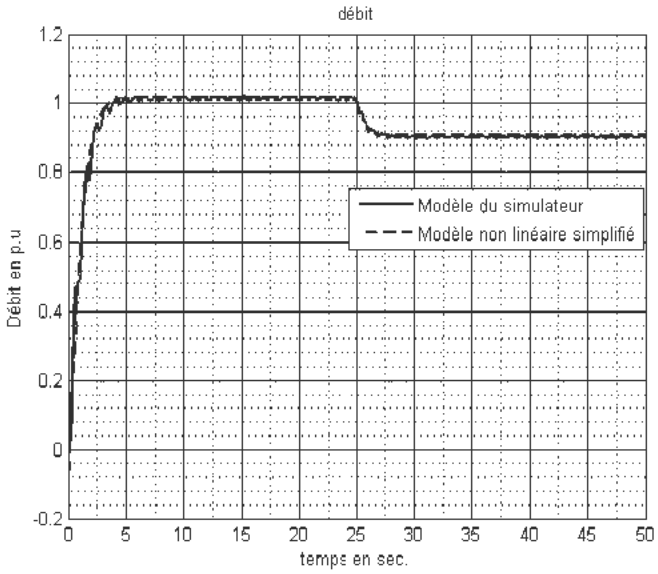


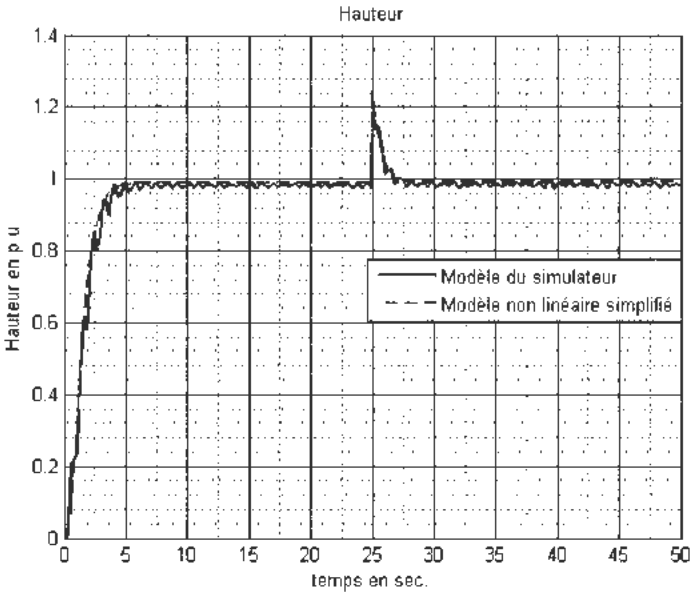
Figure 4-16 : Modèle non linéaire simplifié de la turbine avec prise en compte des caractéristiques de l'eau et de la conduite

Les matrices A, B, C et D sont déterminées tel que présenté au paragraphe sur la conduite forcée.

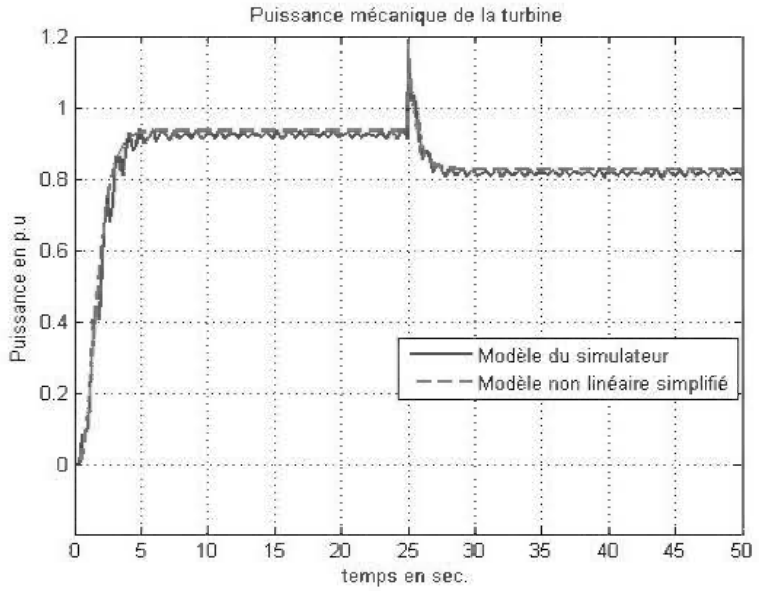
Les données utilisées pour réaliser la simulation sont celles du Tableau 4-4. Les résultats sont superposés à ceux du modèle non linéaire simplifié. Pour effectuer la simulation, on opère une variation du signal à l'entrée (ouverture ou fermeture des directrices : action sur g). Dans un premier temps, on opère une diminution du débit par fermeture des vannes (Figure 4-17). Par la suite, on réalise une ouverture de la vanne afin d'augmenter le débit (Figure 4-18). La représentation faite dans Simulink pour cette simulation est donnée en Annexe 4.



a) Débit



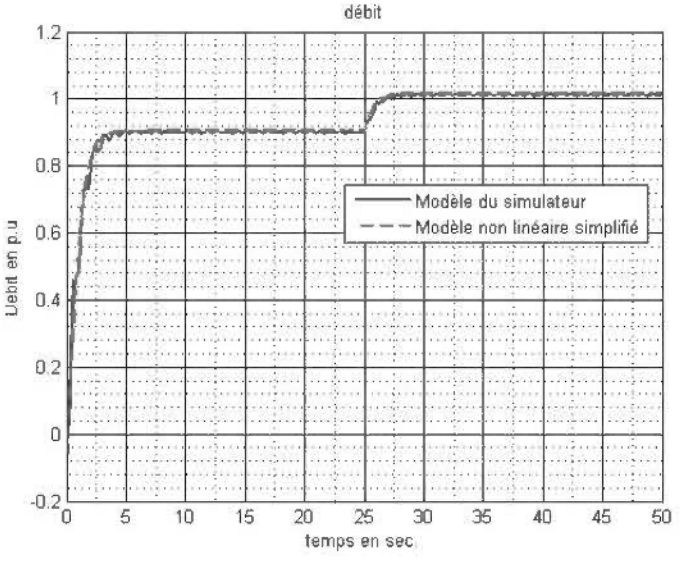
b) Agrandissement du débit



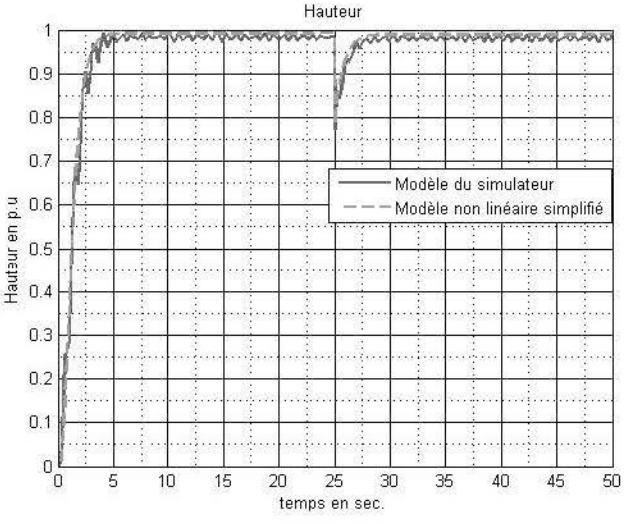
c) Puissance

Figure 4-17 : Résultats du modèle non linéaire simplifié et celui du simulateur pour une variation de 0.9 à 0.8 pu à l'entrée de la vanne : diminution du débit

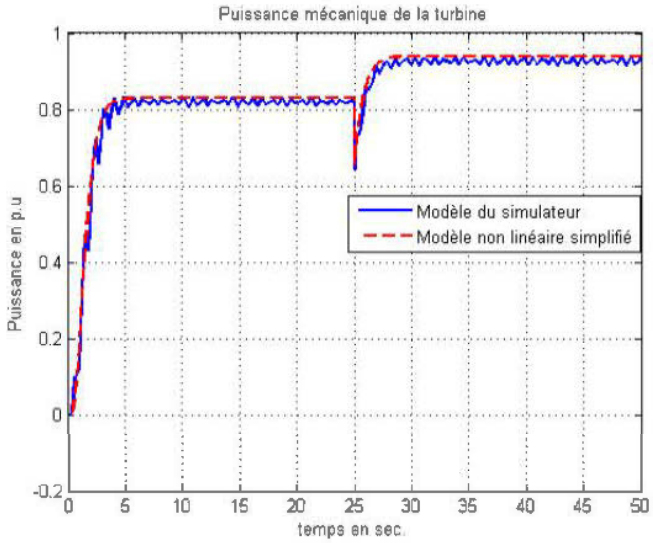
Suite à une variation de 0.9 à 0.8 à l'entrée par action sur g, les débits varient comme attendu (Figure 4-17-a) : il y'a diminution. Les puissances varient inversement à la manœuvre en entrée à l'instant du passage de 0.9 pu à 0.8 pu. Le temps du pique est d'environ deux secondes. La puissance finale a diminué. Cette variation concorde avec les explications données à la suite de la simulation du modèle idéal [12]. Quant aux hauteurs, après la variation, elles reviennent à l'unité, diminuées des pertes par frottement dans la conduite. Comparativement au modèle idéal (Figure 4-15-a), les modèles non linéaires présentés dans cette section atteignent plus rapidement la nouvelle position d'équilibre. La Figure 4-18 présente une ouverture des vannes (augmentation : de 0.8 à 0.9). Dans ce cas, il y'a augmentation de débit et de puissance. On note aussi que les hauteurs et les puissances subissent nne variation inverse à l'action effectuée en entrée (diminution brusque). La puissance revient à une valeur supérieure tandis que la hauteur se rapproche de l'unité. Les résultats restent ceux attendus.



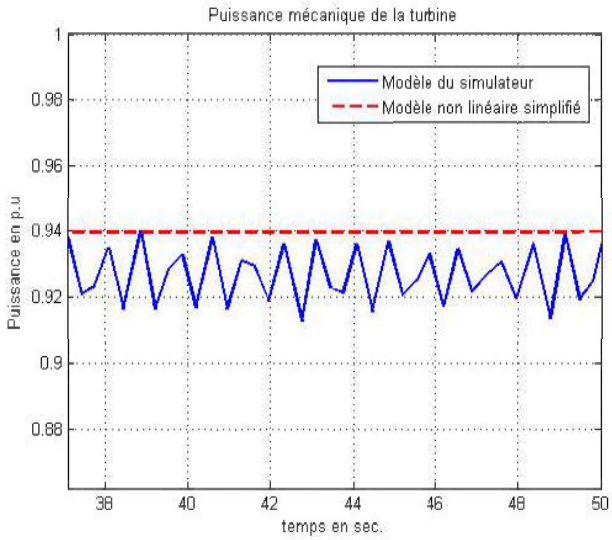
a) Débit



b) Hauteur



c) Puissance

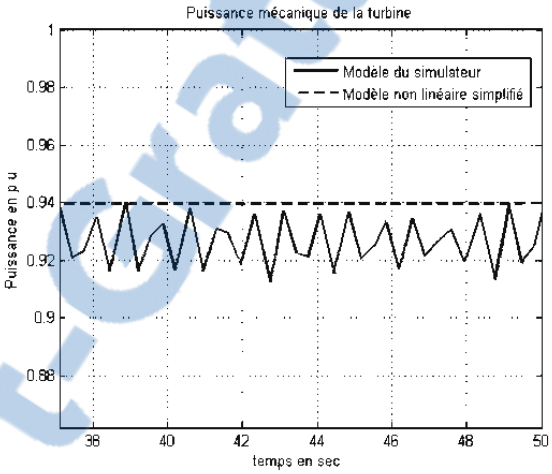


d) Zoom de puissance

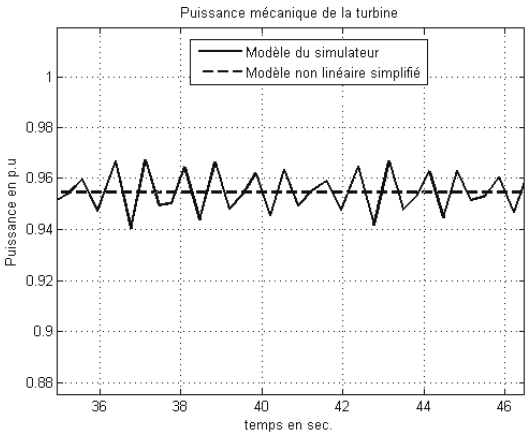
Figure 4-18 : Résultats du modèle non linéaire simplifié et celui du simulateur pour une variation de 0.8 à 0.9 pu à l'entrée de la vanne : augmentation du débit

Un agrandissement de la puissance (Figure 4-18-d) montre que celle du « modèle d'état » n'est pas linéaire. C'est un résultat similaire à celui retrouvé dans le document [25]. Aussi, la puissance du modèle pour le simulateur est légèrement en dessous de

celle du modèle simplifié. Ce qui devrait se justifier par l'orientation des hypothèses. En effet le modèle du simulateur tient compte de la propagation des ondes dans le fluide, de la compressibilité de l'eau et de l'élasticité de la conduite forcée. Ces hypothèses peuvent avoir une influence significative sur le résultat. Pour illustrer ces propos, des essais supplémentaires sont effectués pour différentes valeurs de f. f est le coefficient de frottement de Darcy –Weisbach exprimant la rugosité (résistance hydraulique) de la conduite forcée. Les zooms des puissances pour ces valeurs de f sont présentés à la Figure 4-19.

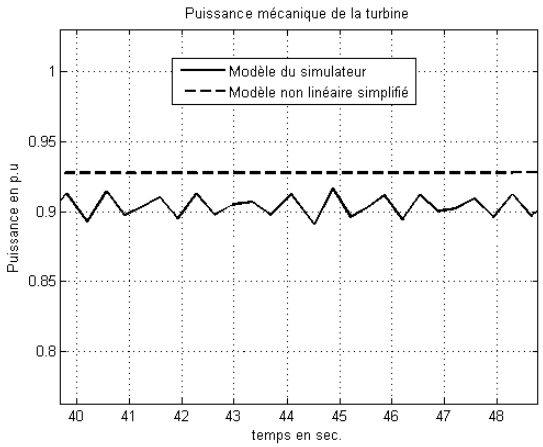


a) Zoom de puissance pour f=0.01



b) Puissance pour f=0.00001

Rapport-Gratuit.com



c) Zoom de puissance pour f=0.018

Figure 4-19 : Influence de la résistance hydraulique sur le modèle de la turbine

Deux remarques importantes sont à relever :

- Plus la valeur de f augmente, plus les pertes de puissance sont considérables pour les deux modèles: La puissance est environ 0.96 pour f=0.00001, 0.94 pour f=0.01 et de 0.93 pour f=0.18. Ainsi, plus la résistance hydraulique est élevée, plus les pertes sont considérables.
- Ces pertes sont plus perceptibles avec le modèle utilisé pour le simulateur. L'écart entre les deux courbes est d'environ 0 pour f=0.00001, de 0. 015 (0.94-0.925) pour f=0.01 et de 0.025 (0.93-0.905) pour f=0.018. Ce qui se justifie par l'utilisation du paramètre f dans les équations de modèle. En effet, dans le modèle non linéaire, l'expression des pertes est donnée par fq^2 (Figure 4-14). Par contre dans l'équation du modèle utilisé pour le simulateur, l'expression est plus complexe ($\frac{fq|q|}{2gDA^2}$). Elle découle des équations aux dérivées partielles ((3.1) et (3.2)). Ce modèle est plus adéquat du fait de l'aspect complet des équations exploitées dans sa mise en œuvre.

4.2 Modélisation du circuit électrique

4.2.1 Modèle de la génératrice synchrone

La plupart des documents utilisent dans la simulation des centrales hydroélectriques, l'équation mécanique du générateur [18, 22, 30]. Ce qui permet de représenter ce dernier comme un simple intégrateur (système de premier ordre). Ceci ne pose aucun problème dans le fonctionnement des modèles. L'objectif étant certainement la compréhension et l'interprétation des phénomènes se produisant au niveau du circuit hydraulique (hauteur, pression, etc.) ou la vitesse de rotation. Cependant, l'approche dans la modélisation de la centrale hydroélectrique (simulateur), doit faire ressortir deux aspects essentiels.

- ***L'aspect didactique et pédagogique***

L'explication simple d'une centrale hydroélectrique est d'utiliser l'énergie potentielle de l'eau pour produire l'énergie électrique. Dans sa dimension pédagogique, l'apprenant doit être capable partant du simulateur numérique de justifier cette définition. L'énergie de sortie ne se caractérise pas seulement par la puissance, mais aussi par les éléments qui la constituent. Ces éléments sont les courants, les tensions, les flux dans la machine. Par ailleurs, la variation de la charge (types de charges), influence considérablement sur les grandeurs de sorties citées plus haut. L'optimisation des paramètres exige d'intégrer une structure globale de la génératrice afin de mieux observer l'impact de chaque paramètre sur son comportement en particulier et sur l'ensemble du système en général. Le choix du modèle (modèle d'état) permet de vérifier aisément et rapidement la stabilité du système isolé. Ainsi, mis à part, il est possible d'influencer sur les paramètres de la génératrice dans le but obtenir le fonctionnement souhaité

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- ***L'aspect scientifique***

Les résultats doivent être en accord avec ceux existants dans la littérature, conformément aux hypothèses simplificatrices de départ. Ces hypothèses sont [31, 32] :

- Les courants de Foucault, les couplages capacitifs entre les enroulements sont supposés négligeables. Cette hypothèse permet d'exprimer tous les flux de la machine en fonction des courants, des inductances propres et mutuelles
- Les résistances (d'induit et d'inducteur) de la machine sont invariantes par rapport aux variations de la température.
- Le circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté, de sorte que seuls les circuits inducteurs, induits et amortisseurs sont parcourus par des courants
- On admet que les forces magnétomotrices des enroulements du stator sont à répartitions sinusoïdales, ce qui conduit à des expressions des inductances relativement simples.

Par ailleurs, la tension de champ et la vitesse de rotation sont supposées constantes. Le système d'excitation et le régulateur de vitesse devant être utilisés dans le modèle final. La saturation du circuit magnétique sera prise en compte uniquement lorsqu'il sera possible de déterminer les paramètres de saturation à partir de la caractéristique à vide réelle de la génératrice [33].

Afin de réaliser le modèle de la génératrice présentée à la Figure 4-20, les équations électriques dans le repère (abc) sont ramenées dans le repère de Park. La charge est aussi ramenée dans le repère de Park. L'équivalence entre les deux tensions (aux bornes de la génératrice et de la charge) permet d'obtenir le modèle d'état en courant (les courants statoriques et rotoriques sont les variables d'états) de la génératrice et de la charge. La commande est la tension de champ.

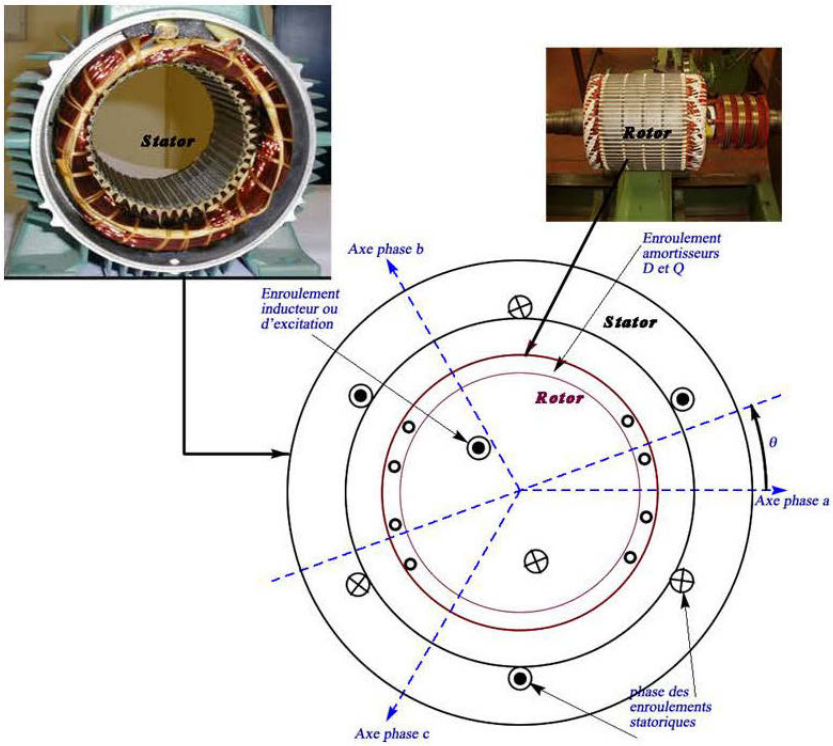


Figure 4-20 : Présentation de la génératrice synchrone

4.2.1.1 *Modèle de la génératrice sans charge*

Les équations dynamiques électromécaniques de la machine synchrone exprimées dans un référentiel abc (Figure 4-21) peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

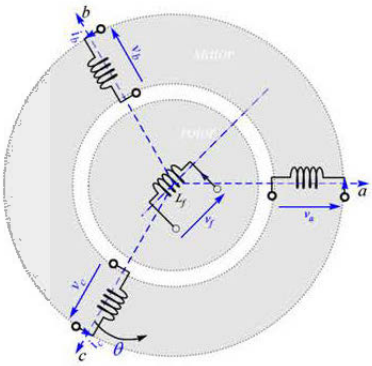


Figure 4-21 : Enroulement du stator et du rotor dans le repère abc

Équations de tension au stator:

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 \\ 0 & 0 & r_a \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{pmatrix} \tag{4.57}$$

Le circuit de champ est alimenté tandis que les amortisseurs sont court-circuités en permanences. Les équations électriques produites pour le rotor sont les suivantes :

$$\begin{pmatrix} v_f \\ v_D \\ v_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{pmatrix} \tag{4.58}$$

Les équations mécaniques régissant le fonctionnement mécanique de l'alternateur synchrone sont :

$$\begin{aligned} p(\omega_m) &= \frac{1}{2H}(T_m - T_e - D\omega_m) \\ p(\delta) &= \omega_n(\omega_m - 1) \end{aligned} \tag{4.59}$$

$$T_e = \psi_q i_d - \psi_d i_q \tag{4.60}$$

Les systèmes d'axe x_{abc} et x_{dqh} sont liés par la relation:

$$\begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = P^{-1}(\theta)\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{pmatrix} \tag{4.61}$$

La matrice de Park P(θ) et son inverse sont données aux équations (4.62) et (4.63)

$$P(\theta) = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{4.62}$$

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \tag{4.63}$$

La loi d'ohm généralisée au stator est exprimée par l'équation (4.64).

$$V_{abc} = Ri_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt} \tag{4.64}$$

$$V_{dq_0} = PV_{abc} \qquad i_{dq_0} = Pi_{abc} \quad et \quad \psi_{dq_0} = P\psi_{abc} \tag{4.65}$$

$$(4.65)\ dans\ (4.64) \Rightarrow PV_{abc} = PRi_{abc} + P\frac{d\psi_{abc}}{dt} \tag{4.66}$$

$$V_{dq_0} = PRP^{-1}i_{dq_0} + P\frac{d(P^{-1}\psi_{dq_0})}{dt}$$

$$V_{dq_0} = RPP^{-1}i_{dq_0} + P\frac{d(P^{-1}\psi_{dq_0})}{dt}$$

$$V_{dq_0} = RPP^{-1}i_{dq_0} + PP^{-1}\frac{d\psi_{dq_0}}{dt} + P\psi_{dq_0}\frac{d(P^{-1})}{dt}$$

$$V_{dq_0} = Ri_{dq_0} + \frac{d\psi_{dq_0}}{dt} + \omega_m\psi_{dq_0}P\frac{d}{d\theta}(P^{-1}) \tag{4.67}$$

De même

$$\frac{dP^{-1}}{d\theta} = \begin{pmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{pmatrix} et\ P\frac{dP^{-1}}{d\theta} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \Xi \tag{4.68}$$

$$(4.68)\ dans (4.67) \Rightarrow V_{dq_0} = -Ri_{dq_0} + \frac{d\psi_{dq_0}}{dt} + \omega_m\psi_{dq_0}\Xi \tag{4.69}$$

$$(4.69)\ en\ pu \Rightarrow \frac{V_{dq_0}}{V_{Sref}} = -\frac{Ri_{dq_0}}{Z_{Sref}i_{Sref}} + \frac{1}{\psi_{Sref}\omega_{Sref}}\frac{d\psi_{dq_0}}{dt} + \frac{\omega_m\psi_{dq_0}\Xi}{\omega_{Sref}\psi_{ref}} \tag{4.70}$$

En pu on obtient l'équation de la loi d'ohm généralisée suivante au stator :

$$V_{dq_0} = -R_0 i_{dq_0} + \frac{1}{\omega_n}\frac{d\psi_{dq_0}}{dt} + \omega_{m_0}\psi_{dq_0}\Xi \tag{4.71}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{pmatrix} + \frac{1}{\omega_n}\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{pmatrix} + \omega_m\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{pmatrix} \tag{4.72}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_d = -r_a i_d + \dfrac{1}{\omega_n}\dfrac{d}{dt}\psi_d - \omega_{m_0}\psi_q \\ v_q = -r_a i_q + \dfrac{1}{\omega_n}\dfrac{d}{dt}\psi_d + \omega_{m_0}\psi_d \\ v_0 = -r_a i_0 + \dfrac{1}{\omega_n}\dfrac{d}{dt}\psi_d + 0 \end{cases} \tag{4.73}$$

En considérant les deux premières équations du système (4.73), on obtient (4.74). L'axe homopolaire étant nul.

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_a & 0 \\ 0 & -r_a \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \frac{1}{\omega_n}\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix} + \omega_{m_0}\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix} \tag{4.74}$$

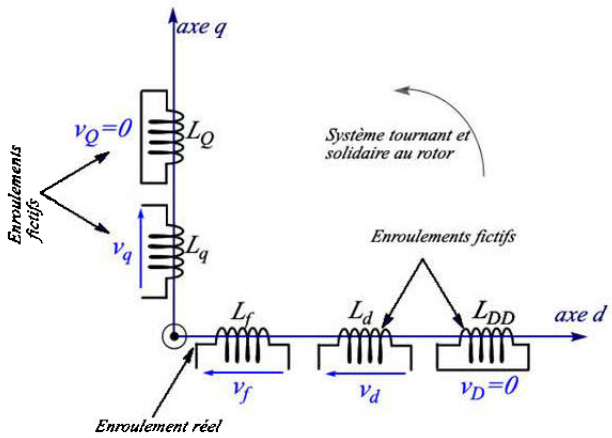


Figure 4-22 : Machine synchrone dans les axes dq

Le système (4.75) représente les équations au rotor.

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + \dfrac{d\psi_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \dfrac{d\psi_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \dfrac{d\psi_Q}{dt} \end{cases} \tag{4.75}$$

$$(4.73)\ et\ (4.75) \Rightarrow \begin{cases} v_d = -r_a i_d + \dfrac{1}{\omega_n}\dfrac{d}{dt}\psi_d - \omega_m \psi_q \\ v_q = -r_a i_q + \dfrac{1}{\omega_n}\dfrac{d}{dt}\psi_d - \omega_m \psi_d \\ v_f = R_f i_f + \dfrac{d\psi_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \dfrac{d\psi_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \dfrac{d\psi_Q}{dt} \end{cases} \tag{4.76}$$

Le modèle de la machine ainsi obtenu est schématisé à la Figure 4-23

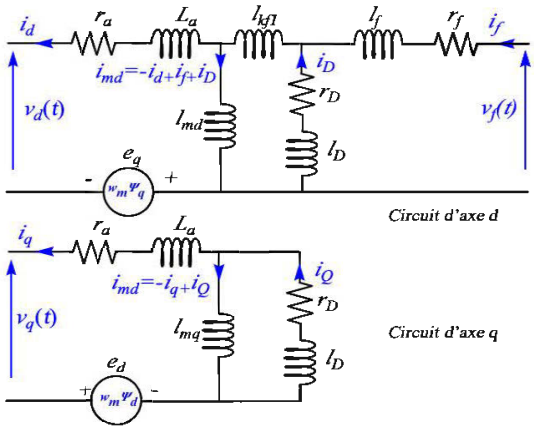


Figure 4-23 : Circuits électriques équivalents de la machine synchrone triphasée dans les axes de Park en mode génératrice

La mise sous forme matricielle du système (4.76) est donnée par(4.77).

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} + \frac{1}{\omega_n}\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} + \omega_m \begin{pmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{4.77}$$

Soit

$$\begin{pmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} \Rightarrow K = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{4.78}$$

On pose

$$\begin{gathered} \boldsymbol{v}_s = \begin{pmatrix} \boldsymbol{v}_d \\ \boldsymbol{v}_q \end{pmatrix}; \boldsymbol{\psi}_s = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\psi}_d \\ \boldsymbol{\psi}_q \end{pmatrix}; \boldsymbol{i}_s = \begin{pmatrix} \boldsymbol{i}_d \\ \boldsymbol{i}_q \end{pmatrix}; \\ \boldsymbol{i}_r = \begin{pmatrix} \boldsymbol{i}_f \\ \boldsymbol{i}_D \\ \boldsymbol{i}_Q \end{pmatrix}; \boldsymbol{v}_r = \begin{pmatrix} \boldsymbol{v}_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \boldsymbol{\psi}_r = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\psi}_f \\ \boldsymbol{\psi}_D \\ \boldsymbol{\psi}_Q \end{pmatrix} \end{gathered} \tag{4.79}$$

$$(4.77) \Rightarrow \begin{pmatrix} v_s \\ v_r \end{pmatrix} = R_m \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \frac{1}{\omega_n}\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{pmatrix} + W \begin{pmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{pmatrix} \tag{4.80}$$

Rapport-Gratuit.com

$$W=\omega_m K=\begin{pmatrix} 0 & -\omega_m & 0 & 0 & 0 \\ \omega_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};R_m=\begin{pmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{pmatrix} \quad (4.81)$$

Flux statoriques et rotoriques dans le cas d'un amortisseur.

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix}=-\begin{pmatrix} x_{dd} & 0 \\ 0 & x_{qq} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{dQ} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (4.82)$$

$$\begin{pmatrix} \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix}=-\begin{pmatrix} x_{df} & 0 \\ x_{dD} & 0 \\ 0 & x_{dQ} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} x_{ff} & x_{fD} & 0 \\ x_{Df} & x_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{DD} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (4.83)$$

$$\begin{pmatrix} \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix}=-\begin{pmatrix} x_{df} & 0 \\ x_{dD} & 0 \\ 0 & x_{dQ} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} x_{ff} & x_{fD} & 0 \\ x_{Df} & x_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{DD} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (4.84)$$

$$(4.83)\ et(4.84) \Rightarrow \begin{cases} \psi_d=-x_d i_d+x_{df} i_f+x_{dD} i_D \\ \psi_q=-x_q i_q+x_{qQ} i_Q \\ \psi_f=-x_{df} i_d+x_{ff} i_f+x_{fD_1} i_{D_1} \\ \psi_{D_1}=-x_{dD_1} i_d+x_{D_1 f} i_f+x_{D_1 D_1} i_{D_1} \\ \psi_{Q_1}=-x_{qQ_1} i_q+x_{Q_1 Q_1} i_{Q_1} \end{cases} \quad (4.85)$$

$$(4.85)\Rightarrow \begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_{D_1} \\ \psi_{Q_1} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} -x_d & 0 & x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & -x_q & 0 & 0 & x_{qQ} \\ -x_{df} & 0 & x_{ff} & x_{fD} & 0 \\ -x_{dD} & 0 & x_{Df} & x_{DD} & 0 \\ 0 & -x_{qQ} & 0 & 0 & x_{QQ} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (4.86)$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

On pose

$$X_{ss}=\begin{pmatrix} x_d & 0 \\ 0 & x_q \end{pmatrix};X_{sr}=\begin{pmatrix} x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{qQ} \end{pmatrix};$$

$$X_{rs}=X_{sr}^T=\begin{pmatrix} x_{df} & 0 \\ x_{dD} & 0 \\ 0 & x_{qQ} \end{pmatrix};X_{rr}=\begin{pmatrix} x_{ff} & x_{fD} & 0 \\ x_{Df} & x_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{QQ} \end{pmatrix} \tag{4.87}$$

$$(4.87)\ dans (4.86) \Rightarrow \begin{pmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} -X_{ss} & X_{sr} \\ -X_{sr}^T & X_{rr} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{pmatrix}=X_m\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} \tag{4.88}$$

Finalement,

$$(4.88)\ dans\ (4.85) \Rightarrow \begin{pmatrix} v_s \\ v_r \end{pmatrix}=R_m\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix}+\frac{1}{\omega_n}\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{pmatrix}+W\begin{pmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{pmatrix} \tag{4.89}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} v_s \\ v_r \end{pmatrix}=R_m\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix}+\frac{1}{\omega_n}X_m\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix}+WX_m\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} \tag{4.90}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\omega_n}X_m\dot{x}=-R_m x-WX_m x+u \quad avec\ x=\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix}\ et\ u=\begin{pmatrix} v_s \\ v_r \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow X_m\dot{x}=-\omega_n R_m x-\omega_n WX_m x+\omega_n u$$

D'où

$$\dot{x}=-\omega_n X_m^{-1}R_m x-\omega_n X_m^{-1}WX_m x+\omega_n X_m^{-1}u \tag{4.91}$$

Considérant les courants de sortie comme variables observables, la matrice d'état en courant de la génératrice synchrone s'écrit:

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

$$\begin{cases} \dot{x} = -\omega_n X_m^{-1}\left(R_m + WX_m\right)x + \omega_n X_m^{-1} u \\ y = Cx \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$
$$avec\, A = -\omega_n X_m^{-1}\left(R_m + WX_m\right);\;\; B = \omega_n X_m^{-1};\;\; C = \begin{pmatrix} I_{3,3} & 0_{3,2} \\ 0_{2,3} & 0_{2,2} \end{pmatrix} \tag{4.92}$$

Le modèle en flux est :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = -\omega_n (R_m X_m^{-1} + W)\tilde{x} + \omega_n I u \\ y = CX_m^{-1}\tilde{x} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}\tilde{u} \\ \tilde{y} = \tilde{C}\tilde{x} \end{cases} \tag{4.93}$$

Avec

$$\tilde{x} = \begin{pmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{pmatrix} \;\; et \;\; \psi = Xi \;\; \Rightarrow \;\; \tilde{x} = X_m x \;\; \Rightarrow \;\; x = X_m^{-1}\tilde{x}$$
$$\tilde{A} = -\omega_n\left(R_m X_m^{-1} + W\right);\; \tilde{B} = \omega_n I;\; \tilde{C} = \begin{pmatrix} I_{3,3} & 0_{3,2} \\ 0_{2,3} & 0_{2,2} \end{pmatrix} X_m^{-1} \tag{4.94}$$

Les variables utilisées sont déterminées par :

$$x_{dd} = x_d = x_{md} + x_a \qquad x_{qq} = x_q = x_{mq} + x_a \qquad x_0 \approx x_a$$
$$x_{ff} = x_{md} + \sum_{i=1}^{k} x_{kf_i} + x_f \qquad x_{D_l D_l} = x_{md} + x_{D_l} + \sum_{i=1}^{l} x_{kf_i}$$
$$x_{QQ} = x_{mq} + x_Q \;\; x_{Dd} = x_{dD} = x_{md} \qquad x_{Qq} = x_{qQ} = x_{mq}$$
$$x_{fd} = x_{df} = x_{md} \;\; x_{D_l f} = x_{fD_l} = x_{D_l D_l} - x_{D_l} = x_{md} + \sum_{i=1}^{l} x_{kf_i} \tag{4.95}$$

l= position d'un amortisseur et k=nombre total d'amortisseurs, les indices d, q, D, Q, f désignent respectivement les axes d et q, les amortisseurs d'axe d et q, et l'inducteur.

4.2.1.2 *Modèle de la charge*

Il s'agit ici de trouver les valeurs x_c et r_c correspondantes à une charge donnée. Deux situations sont considérées.

- Charge locale
- Génératrice connectée à un bus infini

Étant donné le modèle de la génératrice, le principe est de ramener toutes les situations à une charge locale. Dans un premier temps, il s'agit de trouver les paramètres liés à une charge locale. Par la suite, la méthodologie de conversion d'un bus infini en une charge locale est suggérée.

i. Charge locale

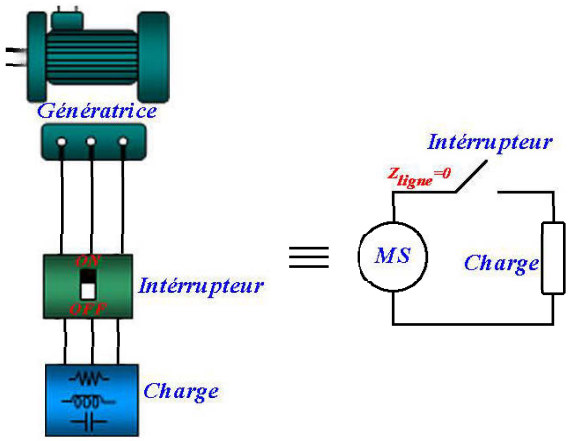


Figure 4-24 : Charge locale

Le modèle de la génératrice liée à la charge par une ligne d'impédance négligeable (Figure 4-24) est pratiquement adapté pour les mini centrales à gaz, éoliennes, hybrides, et hydrauliques [34]. La charge est généralement désignée par (P, V, Q). P, Q et V sont

respectivement, la puissance active et réactive de la charge, la tension aux bornes de la charge. Pour un état d'équilibre donné, il est possible de trouver l'impédance équivalente de la charge à partir des équations suivantes [34] :

$$r_c = \frac{P_t}{i_t^2} = P_t\left(\frac{z_c}{V_t}\right)^2 \quad et \quad x_c = \frac{Q_t}{i_t^2} = Q_t\left(\frac{z_c}{V_t}\right)^2 \tag{4.96}$$

$z_c = r_c + jx_c$ est la valeur par unité de l'impédance équivalente de la charge. L'indice t désigne le point de fonctionnement considéré.

ii. Charge infinie

Dans ce cas, on considère que l'impédance de ligne n'est plus nulle [35]. Cette considération impose :

- Une chute de tension en ligne
- Une perte de puissance absorbée par la ligne

Les données disponibles sont généralement les puissances (active et réactive : P_∞; Q_∞) et la tension infinie (V_∞). Ces valeurs peuvent être déterminées au besoin par les techniques d'écoulement de puissance [36]. Les valeurs à déterminer sont les puissances et la tension ramenées à la génératrice.

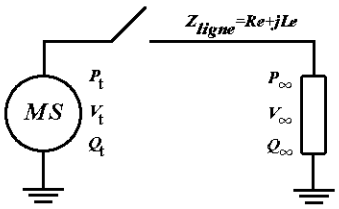


Figure 4-25 : Génératrice connectée à un bus infini

$$P_\infty = \frac{|\bar{V}_t||\bar{V}_\infty|}{X_e}\sin\delta \tag{4.97}$$

$$Q_\infty = \frac{|\bar{V}_t||\bar{V}_\infty|}{X_e}\cos\delta - \frac{|\bar{V}_\infty|^2}{X_e} \tag{4.98}$$

$$\frac{|\bar{V}_t||\bar{V}_\infty|}{X_e} = k_1 \ et \ \frac{|\bar{V}_\infty|^2}{X_e} = k_2 \quad (4.99)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_\infty = k_1 \sin\delta \\ Q_\infty = k_1 \cos\delta - k_2 \end{cases}$$

(4.97) à (4.98)

$$\Rightarrow \begin{cases} \sin\delta = \dfrac{P_\infty}{k_1} \\ \cos\delta = \dfrac{Q_\infty + k_2}{k_1} \end{cases} \tag{4.100}$$

$$\sin^2\delta + \cos^2\delta = 1 \Rightarrow \sin\delta = \sqrt{1-(\cos\delta)^2} \quad (0 \le \delta \le \pi) \tag{4.101}$$

(4.100) et (4.101) $\Rightarrow k_1 = \sqrt{(P_\infty)^2 + (Q_\infty + k_2)^2}$ *et* $|\bar{V}_t| = \dfrac{k_1 X_e}{|\bar{V}_\infty|}$

$$\Rightarrow k_1 = \sqrt{(P_\infty)^2 + (Q_\infty + k_2)^2} \ et \ |\bar{V}_t| = \frac{k_1 X_e}{|\bar{V}_\infty|} \tag{4.102}$$

$$|\bar{V}_t| = \frac{k_1 X_e}{|\bar{V}_\infty|} = \frac{X_e\sqrt{(P_\infty)^2 + \left(Q_\infty + \dfrac{|\bar{V}_\infty|^2}{X_e}\right)^2}}{|\bar{V}_\infty|}$$

$$et \ \sin\delta = \frac{P_\infty}{\sqrt{(P_\infty)^2 + \left(Q_\infty + \dfrac{|\bar{V}_\infty|^2}{X_e}\right)^2}} \tag{4.103}$$

Soit

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Q_\infty}{P_\infty}\right); et\, P_\infty = V_\infty I_\infty \cos\alpha \Rightarrow I_\infty = \frac{P_\infty}{V_\infty \cos\alpha} \quad et\ I_\infty = I_t \tag{4.104}$$

Finalement,

$$P_t = P_\infty - 3r_e I_t^2 \quad ; \; Q_t = Q_\infty - 3X_e I_t^2 \tag{4.105}$$

D'autre part il est possible d'exploiter la loi de maille dans le circuit de la Figure 4-25, comme suit

$$v_{abc} = v_{\infty abc} + R_e I i_{abc} + L_e I \dot{i}_{abc} \tag{4.106}$$

Dans le repère de Park, nous avons :

$$P v_{abc} = P v_{\infty abc} + R_e P i_{abc} + L_e P \dot{i}_{abc} = v_{\infty dq0} + R_e i_{dq0} + L_e P \dot{i}_{abc} \tag{4.107}$$

Où I désigne la matrice identité et P la matrice de Park définie au(4.62).

$$v_{\infty abc} = \sqrt{2} V_\infty \begin{pmatrix} \cos(\omega_R t + \alpha) \\ \cos\left(\omega_R t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega_R t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \tag{4.108}$$

$$\theta = \omega_R t + \delta + \frac{\pi}{2}, \tag{4.109}$$

$$(4.108)\ et\ (4.109) \Rightarrow v_{\infty dq0} = Pv_{\infty abc} = V_\infty \begin{bmatrix} -\sin(\delta-\alpha) \\ \cos(\delta-\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (4.110)$$

Les valeurs sont en pu. Dans la suite, V_∞ et toutes les autres données sont en pu.

Par ailleurs,

$$i_{dq0} = Pi_{abc} \Rightarrow \dot{i}_{dq0} = \dot{P}i_{abc} + P\dot{i}_{abc} \Rightarrow \dot{i}_{dq0} - \dot{P}i_{abc} = P\dot{i}_{abc} \qquad (4.111)$$

$$\dot{P}i_{abc} = \dot{P}Pi_{dq0} = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \qquad (4.112)$$

(4.110) à (4.112) dans(4.107)

$$\Rightarrow v_{dq0} = V_\infty \begin{bmatrix} -\sin(\delta-\alpha) \\ \cos(\delta-\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} + r_e i_{dq0} + l_e \dot{i}_{dq0} + l_e \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \qquad (4.113)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_d = -V_\infty \sin(\delta-\alpha) + r_e i_d + l_e \dot{i}_d - l_e \omega i_q \\ v_q = V_\infty \cos(\delta-\alpha) + r_e i_q + l_e \dot{i}_q + l_e \omega i_d \end{cases} \qquad (4.114).$$

Les calculs s'opèrent à un point précis de fonctionnement, supposé invariant. Cette hypothèse permet de considérer les dérivées nulles et l'équation (4.114) est remplacé par :

$$\begin{cases} v_d = -V_\infty \sin(\delta - \alpha) + r_e I_d - X_e I_q \\ v_q = V_\infty \cos(\delta - \alpha) + r_e I_q + X_e I_d \end{cases} \quad avec\ X_e = l_e \omega \tag{4.115}$$

La majuscule est utilisée pour les courants afin d'indiquer qu'il s'agit d'un point de fonctionnement de régime permanent.

4.2.1.3 *Représentation de la génératrice et de la charge*

L'équation de la charge aux bornes du stator dans le référentiel de Park est donnée par [34]

$$\begin{aligned} & V_s = (R_1 + \omega_m \Xi X_1) i_s + \frac{1}{\omega_n} X_1 P(i_s) \\ & Avec\ R_1 = \begin{pmatrix} r_c & 0 \\ 0 & r_c \end{pmatrix} et\ X_1 = \begin{pmatrix} x_c & 0 \\ 0 & x_c \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{4.116}$$

Les tensions aux bornes de la génératrice et de la charge sont égales. L'égalité des équations (4.90) et (4.116) permets après réorganisation d'obtenir le modèle de l'équation (4.117).

$$\begin{aligned} & R_m \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \frac{1}{\omega_n} X_m \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + W X_m \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} \left[R_1 + \omega_m \Xi X_1, 0_{2,3} \right] \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \left[\frac{1}{\omega_n} X_1, 0_{2,3} \right] \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} \\ V_f \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{4.117}$$

$$= \begin{pmatrix} \left[R_1 + \omega_m \Xi X_1, 0_{2,3}\right]\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \left[\frac{1}{\omega_n} X_1, 0_{2,3}\right]\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} \\ 0_{3,5} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} V_f$$

$$= \begin{pmatrix} R_1 + \omega_m \Xi X_1 & 0_{2,3} \\ 0_{3,2} & 0_{3,3} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{\omega_n} X_1 & 0_{2,3} \\ 0_{3,2} & 0_{3,3} \end{pmatrix}\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} V_f \tag{4.118}$$

On pose

$$N_1 = \begin{pmatrix} R_1 + \omega_m \Xi X_1 & 0_{2,3} \\ 0_{3,2} & 0_{3,3} \end{pmatrix} \quad N_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\omega_n} X_1 & 0_{2,3} \\ 0_{3,2} & 0_{3,3} \end{pmatrix} \; et \; N_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{4.119}$$

$$(4.119) \; dans \; (4.118) \Rightarrow N_1 I + N_2 \dot{I} + N_3 V_f = R_m I + \frac{1}{\omega_n} X_m \dot{I} + W X_m I \tag{4.120}$$

$$\Rightarrow (N_2 - \frac{1}{\omega_n} X_m)\dot{I} = (R_m + W X_m - N_1) I - N_3 V_f \tag{4.121}$$

Le modèle d'état de la génératrice intégrant la charge est:

Rapport-Gratuit.com

$$\begin{cases} \dot{I} = (N_2 - \frac{1}{\omega_n} X_m)^{-1}(R_m + WX_m - N_1)I + [-(N_2 - \frac{1}{\omega_n} X_m)^{-1} N_3] v_f \\ \begin{pmatrix} i_s \\ i_f \\ v_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{3,3} & 0_{3,2} \\ & J_{1(2,5)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0_{3,1} \\ J_{2(2,1)} \end{pmatrix} V_f \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{I} = A_c I + B_c V_f \\ y = C_c I + D_c V_f \end{cases}$$

$$A_c = (N_2 - \frac{1}{\omega_n} X_m)^{-1}(R_m + WX_m - N_1) \quad B_c = -(N_2 - \frac{1}{\omega_n} X_m)^{-1} N_3 \tag{4.122}$$

$$C_c = \begin{pmatrix} I_{3,3} & 0_{3,2} \\ & J_{1(2,5)} \end{pmatrix} \qquad D_c = \begin{pmatrix} 0_{3,1} \\ J_{2(2,1)} \end{pmatrix}$$

Les courants statoriques, de champ et les tensions statoriques sont les variables observables. Les courants de la machine sont les variables d'états et la tension rotorique est la variable de commande.

Déterminons la matrice $J_{1(2,5)}$ *et* $J_{2(2,5)}$

$$\begin{pmatrix} i_s \\ i_f \\ V_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{3,3} & 0_{3,2} \\ & J_{1(2,5)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0_{3,1} \\ J_{2(2,1)} \end{pmatrix} V_f \Rightarrow \begin{pmatrix} i_s \\ i_f \\ V_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{3,3} & 0_{3,2} \\ & J_{1(2,5)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0_{3,1} \\ J_{2(2,1)} \end{pmatrix} V_f \tag{4.123}$$

Par ailleurs

$$\begin{cases} v_d = -r_a i_d + \dfrac{1}{\omega_n}\dfrac{d}{dt}\psi_d - \omega_m \psi_q \\ v_q = -r_a i_q + \dfrac{1}{\omega_n}\dfrac{d}{dt}\psi_d - \omega_m \psi_d \end{cases} \tag{4.124}$$

$$\psi_d = -x_d i_d + x_{df} i_f + x_{dD} i_D \quad et \quad \psi_q = -x_q i_q + x_{qQ} i_Q$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_d = -r_a i_d + \dfrac{1}{\omega_n}\dfrac{d}{dt}(-x_d i_d + x_{df} i_f + x_{dD} i_D) - \omega_m(-x_q i_q + x_{qQ} i_Q) \\ v_q = -r_a i_q + \dfrac{1}{\omega_n}\dfrac{d}{dt}(-x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - \omega_m(-x_d i_d + x_{df} i_f + x_{dD} i_D) \end{cases} \tag{4.125}$$

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_a & \omega_m x_q & 0 & 0 & -\omega_m x_{qQ} \\ -\omega_m x_d & -r_a & \omega_m x_{df} & \omega_m x_{dD} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \tag{4.126}$$

$$+ \frac{1}{\omega_n} \begin{pmatrix} -x_d & 0 & x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & -r_q & 0 & 0 & x_{qQ} \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Soit

$$T_1 = \begin{pmatrix} -r_a & \omega_m x_q & 0 & 0 & -\omega_m x_{qQ} \\ -\omega_m x_d & -r_a & \omega_m x_{df} & \omega_m x_{dD} & 0 \end{pmatrix} \tag{4.127}$$

et $$T_2 = \frac{1}{\omega_n}\begin{pmatrix} -x_d & 0 & x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & -r_q & 0 & 0 & x_{qQ} \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = T_1 x + T_2 \dot{x}$$

(4.127) dans(4.126) $$= T_1 x + T_2 (A_c x + B_c u) \tag{4.128}$$

$$= (T_1 + T_2 A_c) x + T_2 B_c u$$

$$\Rightarrow \begin{cases} J_1 = T_1 + T_2 A_c \\ J_2 = T_2 B_c \end{cases} \tag{4.129}$$

4.2.1.4 *Prise en compte de la saturation*

Dans la plupart des cas, la machine fonctionne en saturation. La saturation implique que les réactances dans l'axe d et q n'ont pas une valeur fixe. Même si les résultats obtenus avec les réactances fixes ne sont pas très loin de ceux obtenus avec la saturation, il est meilleur de faire les simulations en se rapprochant le plus possible des conditions réelles. Ainsi, la prise en compte de la saturation implique qu'il faut constamment actualiser les valeurs des réactances x_{md} *et* x_{mq}. Ce phénomène est bien expliqué dans le document [33]. Les réactances se calculent comme suit :

$$x_{md} = \frac{\psi_m}{I_m} = K_i\left(I_m\right) \times x_{md}^0 \; et \; x_{mq} = K_i\left(I_m\right) \times x_{mq}^0 = \frac{x_{md}}{x_{md}^0} x_{mq}^0$$

$$Avec$$

$$\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \Delta^2 \psi_{mq}^2} \quad et \; I_m = \sqrt{\left(-i_d + i_f + i_D\right)^2 + \frac{1}{\Delta^2}\left(-i_q + i_Q\right)^2} \tag{4.130}$$

$$\Delta^2 = \frac{x_{md}^0}{x_{mq}^0} \; ; \psi_{md} = x_{md}\left(-i_d + i_f + i_D\right) \; et \; \psi_{mq} = x_{mq}\left(-i_q + i_Q\right)$$

$$K_i\left(I_m\right) = 1 + a_1 I_m + a_2 I_m^2 + ... + a_z I_m^z$$

$x_{mq}^0 \; et \; x_{md}^0$ sont respectivement les réactances de magnétisation non saturées dans l'axe d et q.

Les coefficients $a_1, a_2, ..., a_z$ sont obtenus à partir de la caractéristique à vide de la génératrice (Courbe de magnétisation). Dans le programme de simulation de la génératrice finale, les réactances sont donc évaluées en temps réel. Les coefficients de saturations sont obtenus à l'aide de la fonction *polyfit* de Matlab. Cette fonction est appliquée avec les données de la caractéristique à vide de la génératrice considérée.

iii. Calcul des conditions initiales et détermination des paramètres de simulation

Conditions initiales [37]

Une bonne simulation de la machine exige avant tout la détermination des conditions initiales et des paramètres de simulation à partir des données du constructeur. Les conditions initiales dans le cas du modèle de ce document, sont les valeurs des variables d'états (courants statoriques et rotoriques) et de la tension de champ. À ces valeurs, on peut ajouter la position du rotor (angle interne), la puissance électrique et la puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice.

Avant toute perturbation, la machine est dans un régime de fonctionnement permanent imposé par la charge. Dans ce cas, les courants dans la machine sont constants. Les

courants des amortisseurs et toutes les dérivées sont nuls. Les grandeurs du régime permanent sont notées en majuscule.

Les tensions au stator sont données par l'équation (4.131).

$$\begin{cases} V_d = -r_a I_d - \omega_{m_0} \psi_q \\ V_q = -r_a I_q + \omega_{m_0} \psi_d \end{cases} \quad avec \quad \begin{cases} \psi_d = x_d I_d + x_{md} i_f \\ \psi_q = x_q I_q \end{cases} \tag{4.131}$$
$$x_{md} i_f = E \quad (force\,électromotrice)$$

La tension à la sortie de la machine dans le repère abc pour un système équilibré est donnée par (4.132)

$$V_a = \left(V_d \cos\theta + V_q \sin\theta\right) \; et\, \theta = \omega_m t + \delta + \frac{\pi}{2} \tag{4.132}$$

$$(4.131)\ à\ (4.132) \Rightarrow V_t = -r_a\left(I_d \angle \delta + \frac{\pi}{2} + I_q \angle \delta\right) - x_q I_q \angle \delta + \frac{\pi}{2} + x_d I_d \angle \delta + E \angle \delta$$

$$\Rightarrow V_t = -r_a\left(I_d \angle \delta + \frac{\pi}{2} + I_q \angle \delta\right) - x_q I_q \angle \delta + \frac{\pi}{2} + x_d I_d \angle \delta + E \angle \delta \tag{4.133}$$

Le diagramme des phaseurs qui en découle est représenté à la Figure 4-26.

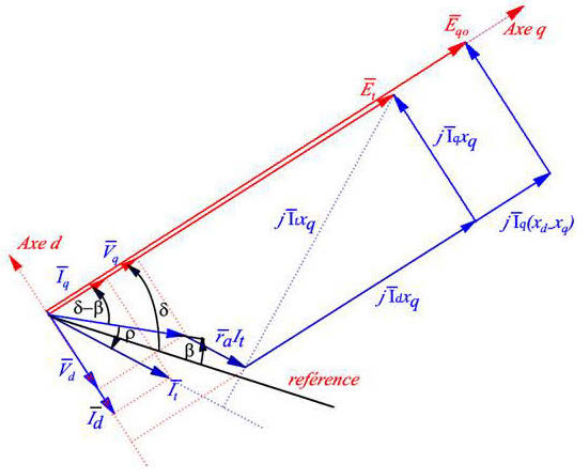


Figure 4-26 : Diagramme des phaseurs de la génératrice en régime permanent

Les grandeurs connues sont la puissance consommée (active : P_t et réactive : Q_t), et soit la tension au bus infinie et l'impédance de la ligne, soit la tension au niveau de la génératrice.

Les grandeurs souhaitées se calculent donc comme suit.

$$I_t = \frac{P_t}{V_t \cos\rho}; \;\; avec \;\; \rho = ar\tan\left(\frac{Q_t}{P_t}\right) \tag{4.134}$$

$$\delta - \beta = arc\tan\left(\frac{x_q I_t \cos\rho - r_a I_t \sin\rho}{V_t + r_a I_t \cos\rho + x_q I_t \sin\rho}\right) \tag{4.135}$$

À partir de $\delta - \beta$ (4.135) et de la trigonométrique dans la Figure 4-26, on trouve v_d *et* v_q (4.136) et les courants i_d *et* i_q (4.137). La force électromotrice et la tension de champ sont données par (4.138) et (4.139). Le flux est donné à l'équation(4.140).

$$V_q = V_t \cos(\delta - \beta) \;\; et \;\; V_d = -V_t \sin(\delta - \beta) \tag{4.136}$$

$$I_d = -I_t \sin\alpha_t \;\; et \;\; I_q = I_t \cos\alpha_t$$
$$avec \;\; \alpha_t = (\delta - \beta) + \rho \tag{4.137}$$

$$E = V_q + r_a I_q - x_d I_d \;\; et \; i_f = \frac{E}{x_{md}} \tag{4.138}$$

$$v_{f0} = r_f i_f = r_f \frac{E}{x_{md}} \tag{4.139}$$

$$\Psi = X_m I \;\; ; T_e = i_q \psi_d - i_d \psi_d ; T_m = T_e + D\omega_m \tag{4.140}$$

$avec\ I = [i_d; i_q; i_f; 0; 0]$ Pour une machine à un seul amortisseur. Le code Matlab élaboré pour le calcul des conditions initiales est donné en annexe 5. Cependant, il est important de noter que les conditions initiales finales se trouvent telles qu'illustrées dans la suite.

Cette méthode de calcul des conditions est similaire à celle du document [38]. Cependant, il faut noter que les matrices de conversion dans le référentiel de Park diffèrent d'un facteur $\sqrt{2}$. Bien plus, ces grandeurs utilisées dans la simulation ne permettent pas d'obtenir immédiatement un fonctionnement stable de la machine. Elles permettent à la génératrice de converger vers le fonctionnement stable souhaité, d'où sont extraites les conditions initiales de simulation. Cette méthode rejoint l'idée développée dans [39] où, les conditions initiales sont obtenues par itération. Le processus d'itération étant remplacé ici par la simulation.

Paramètres de simulation

Les données généralement disponibles pour une machine sont celles du constructeur (Tableau 4-8 ou annexe 10). À partir de ces dernières, il faut déterminer les paramètres de simulation (Tableau 4-9) à partir des équations (4.141) à (4.145). Ces équations établies à partir de celles de l'Annexe 6 sont respectivement l'inductance (4.141)et la

résistance (4.142) de l'enroulement de champ, les inductances (4.143) et les résistances (4.145) des amortisseurs dans les axes d et q.

$$x_f = x_{md}\frac{x'_d - x_a}{x_d - x'_d} \; et \; x_{ff} = x_f + x_{md} \tag{4.141}$$

$$r_f = \frac{x_{ff}}{T'_{d0}\omega_{ref}} \tag{4.142}$$

$$x_D = \frac{x_{md}x_f\left(x''_d - x_a\right)}{x_{md}x_f - x_{ff}\left(x''_d - x_a\right)},\; x_{DD} = x_D + x_{md} \tag{4.143}$$

$$x_Q = \frac{x_{mq}\left(x''_q - x_a\right)}{x_q - x''_q},\; x_{QQ} = x_Q + x_{mq} \tag{4.144}$$

$$r_D = \frac{x''_d\left(x_{DD}x_f - x_{md}^2\right)}{x_{ff}x'_d T''_d\omega_{ref}},\; r_Q = \frac{x''_q x_{QQ}}{T''_q x_q \omega_{ref}} \; avec \; T''_q = \frac{x''_q}{x_q}T''_{q0} \tag{4.145}$$

Le code Matlab de détermination des paramètres est donné en Annexe 6.

4.2.1.5 *Simulation du modèle de la génératrice et de la charge*

L'objectif de cette simulation étant de valider le modèle de la génératrice, les données du Tableau 4-5 et du Tableau 4-6 proviennent du document [34]. La simulation illustrant la conformité de la détermination des paramètres et du calcul des conditions initiales seront faits au paragraphe sur le système d'excitation. La structure du modèle de la machine synchrone implantée dans simulink ainsi que les programmes qui l'accompagne est donnée en Annexe 12. Il s'agit de la structure présente dans le système global
La génératrice a 4 pôles, de puissance 1.5 kVA, 208 V, et de fréquence 60 Hz.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 4-5 : Paramètres de la machine asynchrone

Table 1 : Paramètres de la machine synchrone (pu)			
$r_a = 0.0203$	$r_f = 0.0116$	$r_{D1} = 0.0120$	x_{mq}=0.3707
r_Q= 0.0073	$x_a = 0.0101$	x_f= 0.0713	x_{kf1}=-0.0081
$x_D = 0.669$	$x_{Q1} = 0.1352$	x_{md}=0.6541	

Tableau 4-6 : Conditions initiales de la machine

Table 2 : Conditions initiales (pu)		
$\varphi_a = 0$	$\Psi_{d0} = 0.28426$	$\Psi_{Q0} = -0.20805$
$\Psi_{D0} = 0.28149$	$\Psi_{q0} = -0.20253$	$\Psi_{f0} = 0.34143$
$i_{d0} = 0.39986$	$i_{q0} = 0.54634$	$i_{f0} = 0.84061$
$v_{f0} = 9.7511e-3$	v_{d0}= 0.19993	v_{q0}= 0.27317

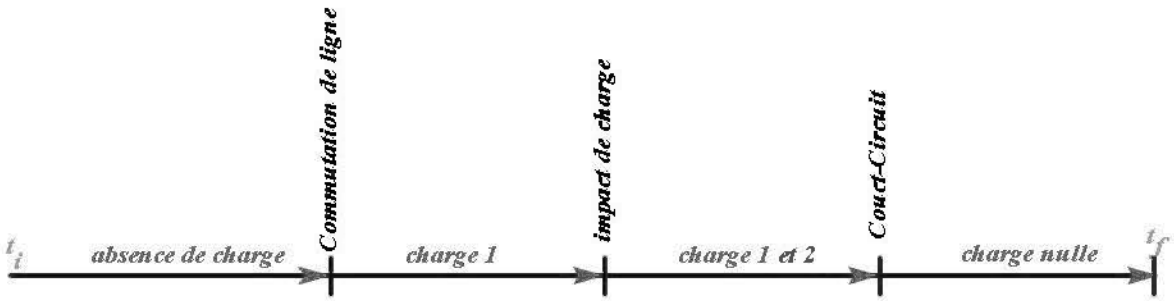


Figure 4-27 : Structure des opérations réalisées pendant l'essai

Trois essais successifs sont réalisés sur le modèle de la machine (Figure 4-27). Il s'agit d'une commutation de ligne sur une charge, d'un délestage et d'un court-circuit. Ces essais démontrent non seulement la concordance des résultats avec les modèles existants, mais aussi l'aspect dynamique de la génératrice. Chaque essai dure une seconde, pour un temps total de quatre secondes.

Le test de commutation est clairement exposé dans le document [33]. Il s'agit de mettre en marche l'interrupteur 1 de la Figure 4-28. Puis l'interrupteur 2 est mis en marche

pour la pleine charge. Cette opération se réalise sur le plan des programmes de simulation par ajustement d'une des valeurs de la charge z_s. La machine synchrone fonctionne initialement à vide. Pour réaliser ce test, il est important de choisir un facteur de puissance faible. Dans la pratique, un facteur de puissance élevé (grande puissance active) à tendance à accélérer la génératrice [34]. Après la commutation, on réalise un court-circuit en annulant les valeurs de l'impédance z_s dans le programme de simulation. Le courant de champ initial (tension) peut se calculer à partir de la courbe $v_t = f\left(i_f\right)$. En effet, à vide, $v_t = v_q = x_{md} i_f$.

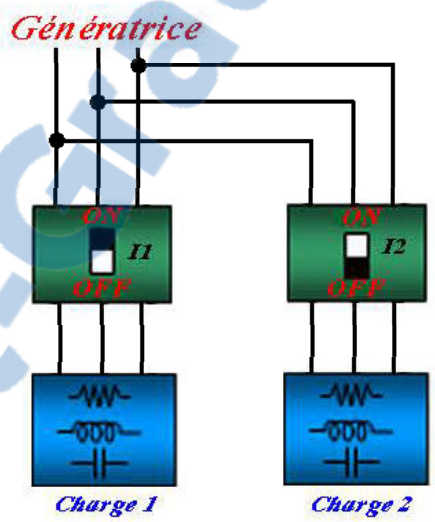


Figure 4-28 : Structure de la charge

Le principe de délestage est aussi explicite dans le document [33]. Il s'agit de mettre hors tension un ou deux interrupteurs dans le schéma de la Figure 4-28. Étant donné que la machine avant le délestage fonctionne en régime nominal, cet essai doit se faire en considérant la génératrice saturée. Les coefficients de saturation sont ceux du Tableau 4-7.

Le test de court-circuit est connu comme celui qui permet une boune excitation de la machine. Ce test est donc très sollicité pour les validations croisées et expérimentales [34]. La génératrice délivre son courant maximal sur une charge nulle. Étant donné que

Rapport-Gratuit.com

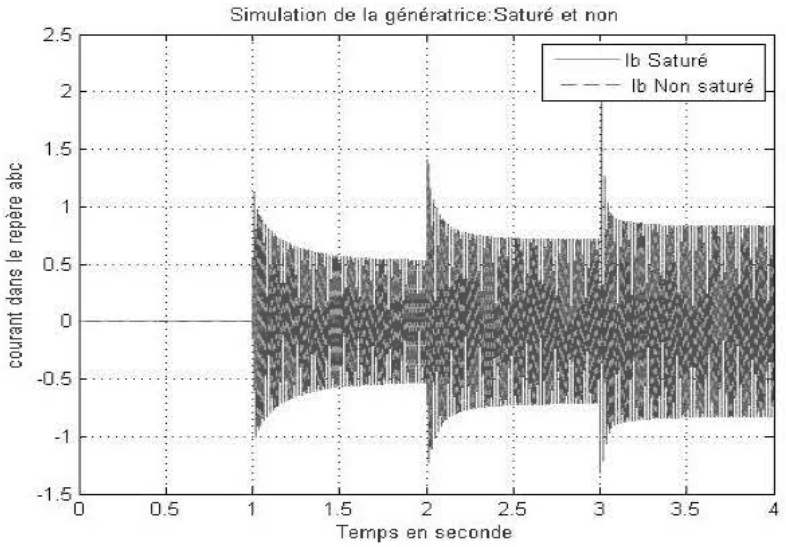
la génératrice fonctionne en régime nominal, il est important de tenir compte de la saturation de cette dernière.

Tableau 4-7 : coefficients de saturation

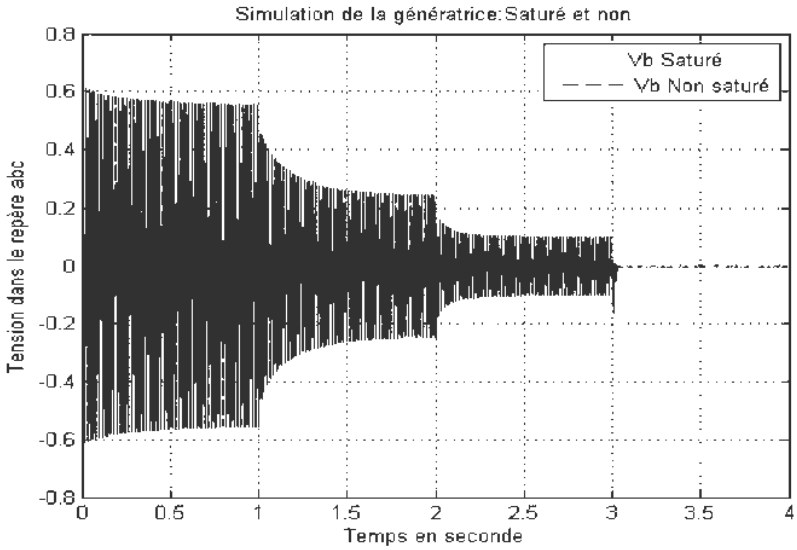
Coefficients de saturation de la génératrice						
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
-0.0036	-0.0114	0.0573	-0.0645	0.0282	-0.0057	0.0004

Pendant toute la simulation, la vitesse de rotation et la tension d'excitation sont des valeurs constantes. Ces valeurs seront fournies dans le système global respectivement par le régulateur de vitesse associé au circuit hydranlique, et le système d'excitation.

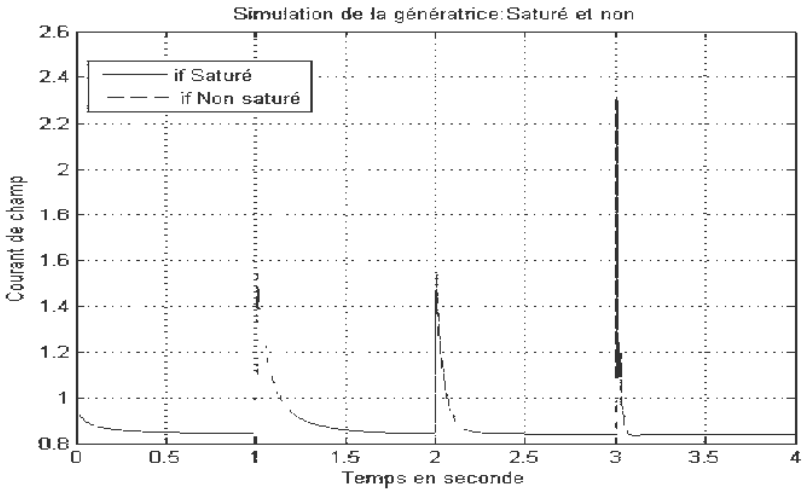
Résultats.



a) Courant dans le repère abc



b) Tension dans le repère abc



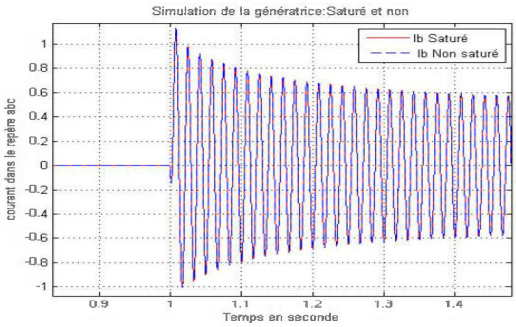
c) Courant de champ

Figure 4-29 : Résultats de simulation de la génératrice

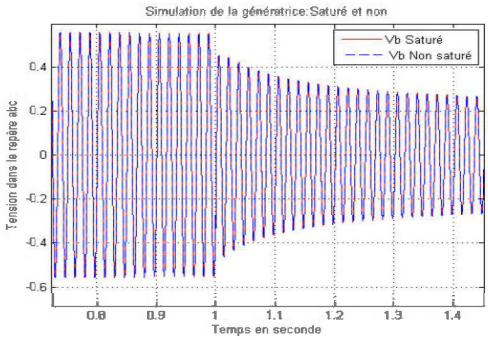
Le dynamisme de la génératrice permet d'effectuer en une seule simulation les essais souhaités (Figure 4-29). Le courant va croissant (Figure 4-29-a) alors que la tension va décroissante (Figure 4-29-b). Il est normal qu'à vide la tension soit maximale et le courant nul. Le phénomène est contraire pendant le court-circuit. Le courant de champ subit des piques pendant les instants de variations (Figure 4-29-c). Le pique est plus

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

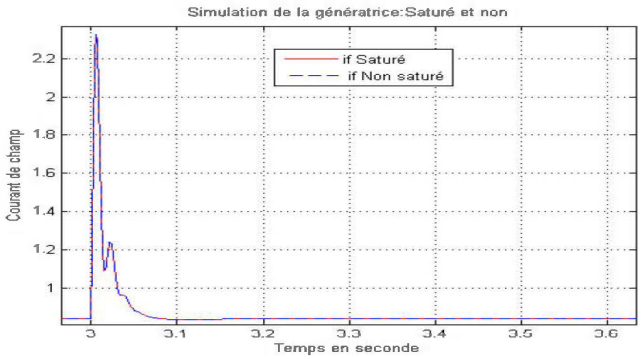
prononcé pendant le court-circuit. On peut constater que la régulation de la génératrice n'est pas assurée. En effet, les essais se réalisent sans le système d'excitation et son régulateur.



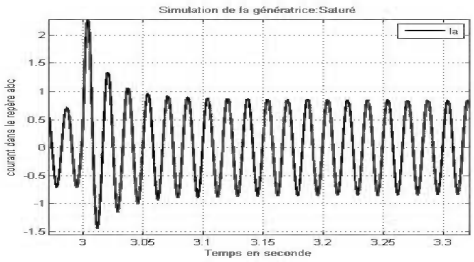
a) Courant Ib à la commutation

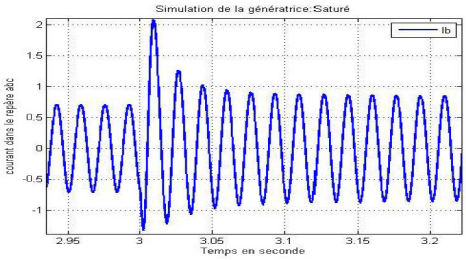


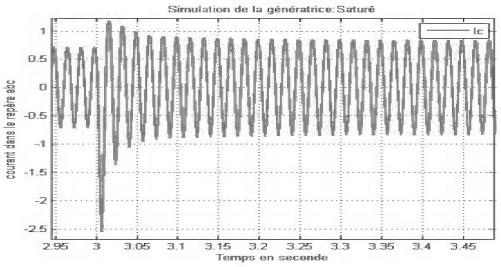
b) Tension Vb à la commutation



c) Courant de champ au court-circuit



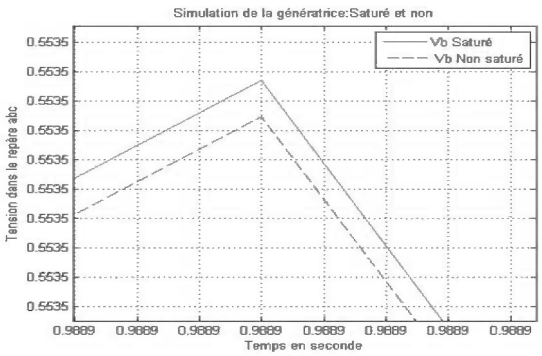




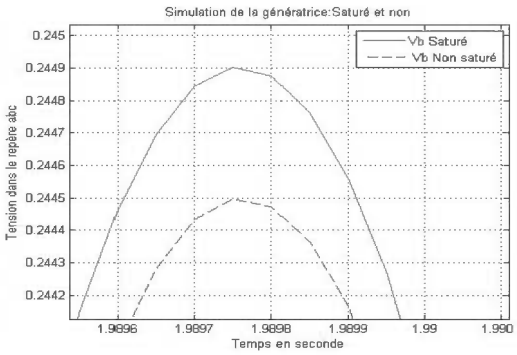
d) Courant de court-circuit décomposé Ia, Ib, Ic.

Figure 4-30 : Conformité des résultats du modèle de la génératrice

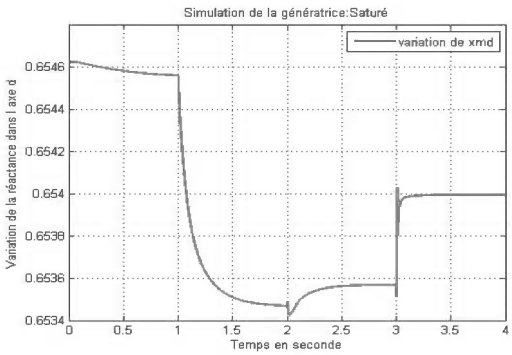
Les différents zooms présentés à la Figure 4-30 concordent avec la littérature (Figure 4-30-a,b,c) et aux attentes (Figure 4-30-d). Les amortisseurs ramènent le courant à une valeur acceptable après le court-circuit.



a) À vide



b) En charge Z_1 et Z_2



c) Variation de xmd

Figure 4-31 : Influence de la saturation sur la tension d'armature

La prise en compte de la saturation permet de constater que l'écart entre la valeur des tensions non saturées et saturées augmente lorsque le courant des armatures augmente. Cet écart est presque nul à vide (Ia=0 :Figure 4-31-a), est de 0.0004 pour un courant de 0.715 p.u (Figure 4-31-b). Cette variation s'explique par la variation des réactances xmd et xmq (Figure 4-31-c).

Le modèle complet de la génératrice intègre le système d'excitation et le régulateur de tension. Par ailleurs, les paramètres de simulation du modèle de la génératrice obtenus à partir des données du constructeur doivent être évalués. Ce travail est présenté dans la suite.

4.3 Modélisation du circuit de contrôle

4.3.1 Modèle de l'excitatrice

L'excitatrice et son régulateur permettent de maintenir constante la tension, quelles que soient les variations de la charge. Le système d'excitation exploité dans ce document est du type Brushless [40]. La spécificité du modèle présenté est qu'il est d'état, réalisé et implémenté dans Matlab/Simulink. Un calcul de valeurs propres avant la simulation est par ailleurs fait dans l'optique de vérifier la stabilité du système. La procédure de modélisation est la suivante :

- Les fonctions de transfert des différents blocs de l'excitatrice sont présentées;
- Ces derniers sont ensuite mis ensemble pour avoir le modèle global sous forme de fonction de transfert
- Le système global est simplifié et les résultats sont exploités pour déterminer les paramètres
- Les différentes fonctions de transfert sont ensuite ramenées dans le domaine temporel pour former le modèle d'état en boucle ouverte, puis en boucle fermée

- Avant de réaliser la simulation, le processus de détermination de la fonction de transfert liant la tension de champ et le courant d'armature de la génératrice est présenté [40]. Il en est de même pour la détermination des paramètres de la génératrice à partir des données du constructeur [38]. La génératrice choisie est celle qui sera exploitée dans le système global. Il s'agit de valeurs typiques des machines utilisées en centrale [38]

Les résultats sont conforment aux attentent. À savoir, une stabilité de la tension quelles que soient les variations de la charge.

4.3.1.1 *Présentation du système d'excitation*

Le rôle, le fonctionnement et l'influence du système d'excitation et du régulateur de tension sur la génératrice synchrone en particulier et le système global en général, sont exposés dans le Chapitre 2. Dans cette partie, il est question de ressortir le modèle du système d'excitation. La structure du système d'excitation Brushless est présentée à la Figure 4-32. Ce système est celui utilisé dans le cadre de cette section.

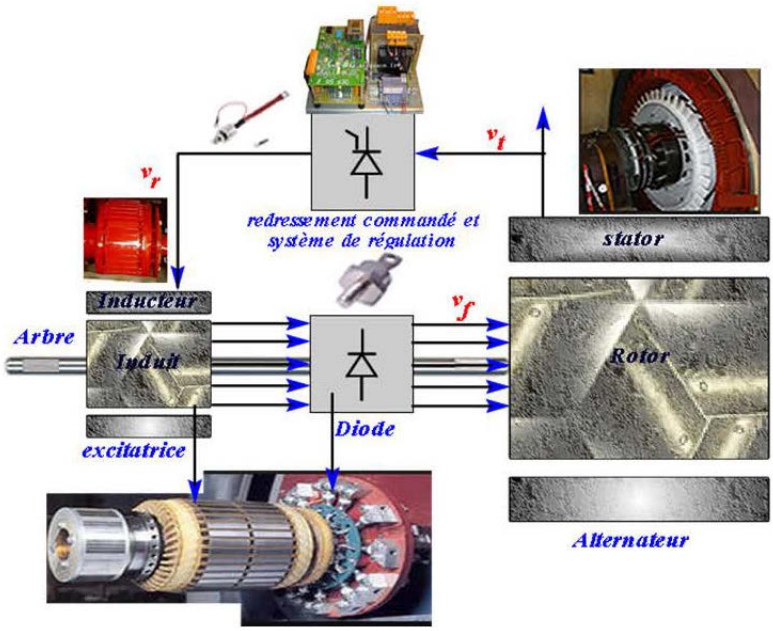


Figure 4-32 : Système d'excitation Brushless

Les différents éléments du système sont :

- ***L'excitatrice et les diodes associées*** : Cet ensemble est ramené à un système de premier ordre et clairement expliqué dans le document [40]. L'entrée est la tension de la sortie du système de régulation (v_r). La sortie est la tension continue qui alimente de rotor de l'alternateur (v_f).

Sa fonction de transfert est donnée à l'équation(4.146).

$$G_e(s) = \frac{v_f}{v_e} = \frac{1}{K_e + \tau_e s}$$
$$Avec\ K_e = \frac{R_e}{x_{em0}} \quad et \quad \tau_e = \frac{N_e \sigma}{k} \tag{4.146}$$

k = Gain remplaçant le redresseur de diodes (≈2.3 pour le pont de diodes triphasé).
La saturation est réalisée par un facteur de saturation utilisé comme boucle de retour à la fonction de transfert précédente.

$$f_{se} = A_e e^{B_e v_f} \tag{4.147}$$

A_e $et B_e$ sont déterminés à partir de la courbe $v_f = f(v_r)$ et de la puissance de l'excitatrice.

La prise en compte de ce facteur dans le dimensionnement de l'excitatrice rend complexe le travail. Le dimensionnement idéal ($f_{se} = 0$) est admis pour l'analyse de la stabilité transitoire [12].

- ***Le redressement commandé*** **:** le redressement commandé fournissant la tension v_r est ramené à une fonction de transfert de premier ordre de l'équation (4.148). L'entrée est l'angle d'amorçage des thyristors et la sortie la tension v_r.

$$G_a(s) = \frac{v_r}{\alpha} = \frac{K_a}{1+\tau_a s} \tag{4.148}$$

K_a *et* τ_a , respectivement le gain et la constante de temps de l'amplificateur, sont déterminés à partir du dimensionnement.

- ***Le compensateur*** : à l'excitatrice et le redresseur à thyristor, on adjoint une boucle de retour (compensateur), qui est une fonction de transfert de premier ordre donnée à l'équation (4.149).

$$G_c(s) = \frac{v_2}{v_f} = \frac{sK_c}{1+\tau_c s} \tag{4.149}$$

K_c *et* T_c , respectivement le gain et la constante de temps du compensateur, sont déterminés à partir du dimensionnement. v_2 est la tension à la sortie du compensateur.

- ***La génératrice synchrone*** : La fonction de transfert liant la tension de champ v_f et la tension de sortie v_t de la machine synchrone est un système de premier ordre dans le repère de Laplace (4.150). Elle correspond à la caractéristique à vide de la génératrice.

$$G_g(s) = \frac{v_t}{v_f} = \frac{K_g}{1+\tau_g s} \tag{4.150}$$

K_g *et* τ_g sont respectivement le gain et la constante de temps de l'alternateur déterminés à partir de la courbe de $G_g(s) = \frac{v_t}{v_f}$ pour une entrée échelon v_t.

- ***Le régulateur*** : le bloc régulateur et de mesure de la tension terminale assurant la boucle de retour est un système de premier ordre dans le domaine de Laplace (4.151).

$$G_r(s) = \frac{v_1}{v_t} = \frac{K_r}{1+T_r s} \tag{4.151}$$

K_r *et* T_r sont respectivement le gain et la constante de temps du régulateur déterminés à partir du dimensionnement.

La Figure 4-32 est remplacée par son équivalent en fonction de transfert de la Figure 4-33. Ce modèle du système d'excitation et d'autres est présent dans le document de référence [38]

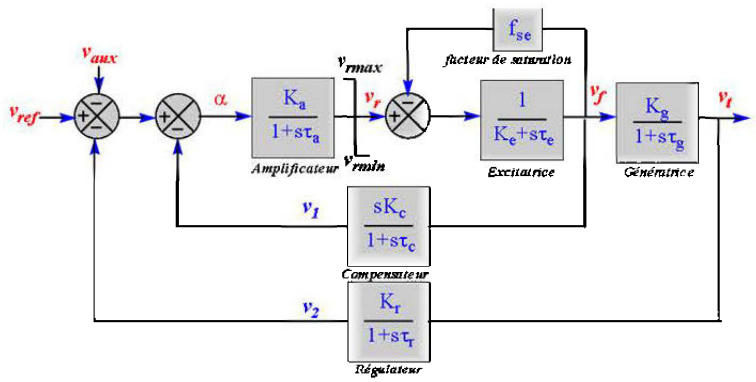


Figure 4-33 : Modèle en fonction de transfert du système d'excitation Bruhsless

Deux approches sont utilisées pour exploiter la Figure 4-33. Il s'agit du développement d'un modèle d'état de l'excitatrice et du dimensionnement de ses paramètres.

Développement du modèle d'état

Il s'agit ici de présenter le modèle d'état du système d'excitation en boucle ouverte (sans régulateur), et en boucle fermée (avec régulateur). Le modèle sans régulateur utilise une commande par retour d'état, et celui avec régulateur exploite les méthodes de dimensionnement par fonction de transfert pour la mise au point du régulateur.

La conversion des fonctions de transfert du domaine de Laplace au domaine temporel sont présentées aux équations (4.152) à (4.158). Il s'agit de l'amplificateur (4.152), de l'excitatrice (4.153), de la génératrice (4.154), et du régulateur (4.158).

$$\frac{v_r}{\alpha} = \frac{K_a}{1+\tau_a s} \Rightarrow \frac{dv_r}{dt} = \frac{1}{\tau_a}\left(\alpha K_a - v_r\right)$$
$$Avec \begin{cases} \alpha = v_{réf} - v_1 & boucle\ \ ouverte \\ \alpha = v_{réf} - v_1 - v_2 & Boucle\ \ fermée \end{cases} \tag{4.152}$$

$$\frac{v_f}{v_r} = \frac{1}{K_e + f_{se} + \tau_e s} \Rightarrow \frac{dv_f}{dt} = \frac{1}{\tau_e}\left(v_r - v_f\left(K_e + f_{se}\right)\right) \tag{4.153}$$

$$\frac{v_t}{v_f} = \frac{K_g}{1+\tau_g s} \Rightarrow \frac{dv_t}{dt} = \frac{1}{\tau_g}\left(v_f K_g - v_t\right) \tag{4.154}$$

$$\frac{v_1}{v_f} = \frac{sK_c}{1+\tau_c s} \Rightarrow \frac{v_1}{s} = v_f K_c - v_1 \tau_c \tag{4.155}$$

En posant, $\frac{v_1}{s} = v_x$ l'équation (4.155) devient :

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{1}{\tau_c}\left(v_f K_c - v_x\right) \tag{4.156}$$

Rapport-Gratuit.com

L'introduction de cette nouvelle variable dans l'équation (4.152) donne :

$$\alpha = v_{réf} - v_1 - v_2 = v_{réf} - \dot{v}_x - v_2 = v_{réf} - \frac{1}{\tau_c}\left(v_f K_c - v_x\right) - v_2 \qquad (4.157)$$

$$\frac{v_2}{v_t} = \frac{K_r}{1+\tau_r s} \Rightarrow \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{\tau_r}\left(v_t K_r - v_2\right) \qquad (4.158)$$

La mise sous forme de système des équations (4.152) à (4.158) donne:

- Pour le modèle d'état en boucle ouverte (4.159)

$$\begin{pmatrix} \dot{v}_r \\ \dot{v}_f \\ \dot{v}_t \\ \dot{v}_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{K_a}{\tau_a} & -\frac{K_a K_c}{\tau_a \tau_c} & 0 & \frac{K_a}{\tau_a \tau_c} \\ \frac{1}{\tau_e} & -\frac{K_e + f_{se}}{\tau_e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_g}{\tau_g} & -\frac{1}{\tau_g} & 0 \\ 0 & \frac{K_c}{\tau_c} & 0 & -\frac{1}{\tau_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_r \\ v_f \\ v_t \\ v_x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{K_a}{\tau_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} v_{réf} \qquad (4.159)$$

- En boucle fermée (4.160):

$$\begin{pmatrix} \dot{v}_r \\ \dot{v}_f \\ \dot{v}_t \\ \dot{v}_x \\ \dot{v}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\tau_a} & -\frac{K_a K_c}{\tau_a \tau_c} & 0 & \frac{K_a}{\tau_a \tau_c} & -\frac{K_a}{\tau_a} \\ \frac{1}{\tau_e} & -\frac{K_e + f_{se}}{\tau_e} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_g}{\tau_g} & -\frac{1}{\tau_g} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_c}{\tau_c} & 0 & -\frac{1}{\tau_c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_r}{\tau_r} & 0 & -\frac{1}{\tau_r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_r \\ v_f \\ v_t \\ v_x \\ v_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{K_a}{\tau_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} v_{réf} \quad (4.160)$$

- ***Détermination des paramètres du système d'excitation***

Les paramètres K_c, K_a, T_c, K_r sont déterminés de manière à rendre le système stable. La simplification de la Figure 4-33 conduit à la Figure 4-34

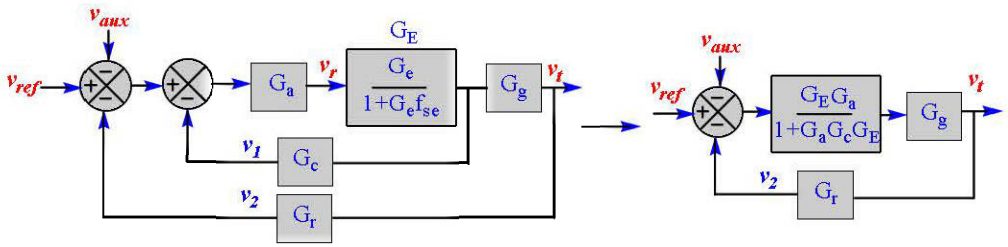


Figure 4-34 : Simplification de la figure 4-28

Mathématiquement, on obtient les équations (4.161) et (4.162).

$$G_{bo}(s) = \frac{G_a G_E G_g G_r}{1 + G_a G_E G_c} \quad (4.161)$$

$$G_{bf}(s) = \frac{G_a G_E G_g}{1 + G_a G_E \left(G_c + G_r G_g\right)} \quad (4.162)$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

En appliquant le théorème de la valeur finale dans le plan de Laplace à la réponse indicielle du système bouclé, nous avons :

$$G_{bo}(s) = \lim_{s \to 0} sG_{bf}(s) = \frac{K_a K_g}{K_a K_g K_r + K_e} \tag{4.163}$$

Comme nous l'avons dit plus haut, K_g est généralement très grand. De ce fait, $K_a K_g K_r \gg K_e$

L'équation (4.163) devient :

$$G_{bo}(s) = \lim_{s \to 0} sG_{bf}(s) = \frac{1}{K_r} \tag{4.164}$$

Pour obtenir un gain unitaire, il faut donc $K_r = 1$. Le gain K_a est déterminé avec la fonction ***rlocus*** de Matlab, appliqué à la fonction de transfert en boucle ouverte [40].

4.3.1.2 *Détermination des paramètres de la génératrice*

i) Détermination des paramètres de simulation

Avant de réaliser la simulation du système d'excitation, il faut déterminer à partir des données du constructeur, les paramètres de la génératrice. Pour ce faire, nous choisissons dans cette section, la génératrice qui sera utilisée dans le modèle global présenté au chapitre suivant. Il s'agit une machine typique des centrales hydroélectriques [38]. C'est une machine ayant 64 pôles, de puissance 231. 6 MVA, pour une tension de 13 800 V. Le facteur de puissance nominale est de 0.95. La fréquence de fonctionnement est de 60Hz. Les données du constructeur utilisées pour le calcul des paramètres conformément

aux équations (4.141) à (4.145) sont contenues dans le Tableau 4-8 (extrait de l'Annexe 7). Les paramètres de simulation sont contenus dans le Tableau 4-9.

Tableau 4-8 : Données du constructeur de la génératrice

Paramètres du constructeur de la génératrice synchrone					
Paramètre	Valeur	Unité	Paramètre	Valeur	Unité
x''_d	1.175	p.u	T''_d	0.020	s
x'_d	0.302	p.u	T'_d	3.3	s
x_d	0.930	p.u	T''_{d0}	0.030	s
x''_q	0.270	p.u	T'_{d0}	8	s
x_q	0.69	p.u	T''_q	0.20	s
r_a	0.0021	p.u	T''_{q0}	0.06	s
x_a	0.34	p.u	r_f	0.181	pu

Tableau 4-9 : Données de sinnulation de la génératrice synchrone

Paramètres de simulation de la génératrice synchrone					
Paramètre	Valeur	Unité	Paramètre	Valeur	Unité
x_f	-0.0357	p.u	x_{md}	0.59	p.u
x_D	0.0633	p.u	x_{mq}	0.35	p.u
x_Q	-0.0583	p.u	x_q	0.69	p.u
r_f	0.0002	p.u	x_d	0.93	p.u
r_D	0.0027	p.u	x_a	0.34	p.u
r_Q	0.0129	p.u			

ii) Simulation

Le modèle de la génératrice utilisé pendant cette simulation est conforme à celui établi dans le paragraphe précédent. On réalise dans un premier temps un test de fonctionnement à vide puis un court-circuit. Les procédures de réalisation de la marche à vide et du court-circuit sont telles qu'expliquées au paragraphe 4.2.1.5. L'essai se fait sans interruption partant du fonctionnement à vide. Il s'agit dans un premier temps de valider les procédures de détermination des conditions initiales et des paramètres de simulations de la génératrice. Ce qui permet de se rassurer des données à utiliser dans le modèle global de la génératrice.

Les conditions initiales obtenues comme indiqué au paragraphe 4.2.1.2, section *iii*, sont contenues dans le Tableau 4-10.

Tableau 4-10 : Conditions initiales avant le court-circuit

Conditions initiales					
Paramètre	Valeur	Unité	Paramètre	Valeur	Unité
i_f	2.7035	p.u	i_d	0.7107	p.u
i_D	0	p.u	i_q	0.6991	p.u
i_Q	0	p.u	v_f	$5.4075\text{x}10^{-4}$	p.u
r_{charge}	1	p.u	x_{charge}	0.3287	p.u

Avant le court-circuit, la génératrice délivre une tension sinusoïdale de valeur maximale 1p.u (Figure 4-35). Le court-circuit est appliqué à la deuxième seconde. Le comportement de la génératrice pendant le court-circuit est conforme avec la littérature

(Figure 4-36). Les amortisseurs réagissent pendant une seconde en moyenne, le temps de variation des courants dans les axes d et q.

Résultats

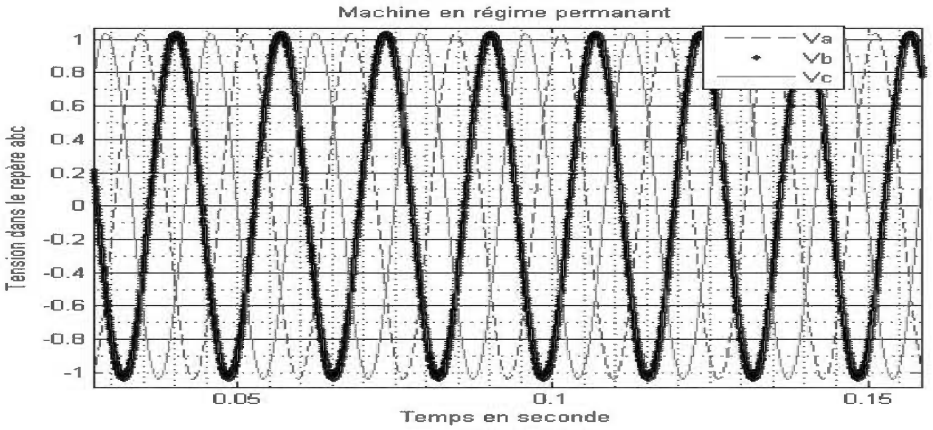
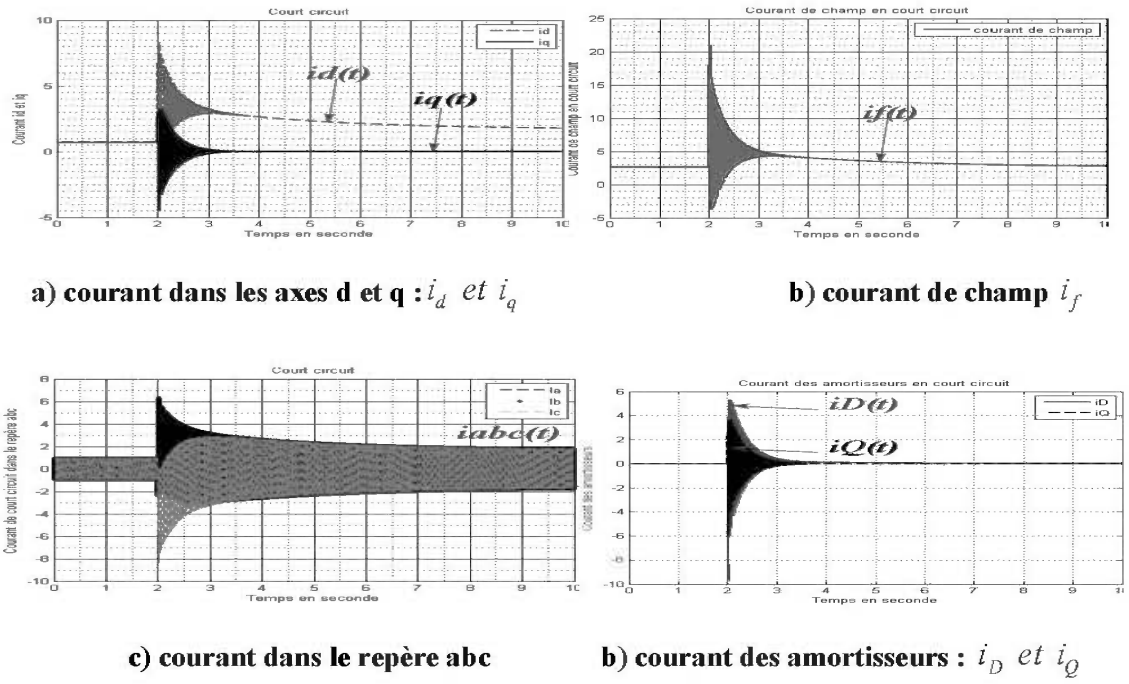


Figure 4-35 : Tension dans le repère abc (fonctionnement à vide de la génératrice)



a) courant dans les axes d et q : i_d *et* i_q **b) courant de champ** i_f

c) courant dans le repère abc **b) courant des amortisseurs :** i_D *et* i_Q

Figure 4-36 : Courant de court-circuit de la génératrice

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- La tension pendant le fonctionnement à vide (Figure 4-36-a) permet de confirmer que, les conditions initiales trouvées conduisent à un fonctionnement stable tel que souhaité. Pour des raisons de clarté des figures, nous avons choisi de faire durer le fonctionnement à vide pour 2s. En augmentant ce temps, les résultats restent valides.
- Le comportement pendant le court-circuit est conforme à la littérature [40]. Il atteste de la validité des paramètres à utiliser pour la génératrice synchrone.

Les méthodes de calcul de paramètres de la génératrice et des conditions initiales sont donc satisfaisantes.

ii) Détermination de la fonction de transfert liant la tension de champ v_f et la tension d'armature de la génératrice v_t

La fonction de transfert liant la tension de champ et la tension d'armature de la génératrice est trouvée en appliquant un échelon de tension de champ à la génératrice à vide. Dans ce cas, la tension dans l'axe d est nulle et celle dans l'axe q est maximale. Les courants étant nuls, l'équation (4.131) devient :

$$\begin{cases} v_d = 0 \\ v_q = v_t = 1 = \omega_{m_0}\psi_d \end{cases} \quad avec \begin{cases} \psi_d = x_{md} i_f \\ \psi_q = 0 \end{cases} \tag{4.165}$$

L'équation (4.165) permet de trouver le courant de champ initial pour cette simulation. On trouve :

$$i_f = \frac{1}{x_{md}} \tag{4.166}$$

Le résumé des conditions initiales est présenté dans le Tableau 4-11:

Tableau 4-11 : Conditions initiales pour la détermination de la fonction de transfert

Conditions initiales pour déterminer la fonction de transfert					
Paramètre	**Valeur**	**Unité**	**Paramètre**	**Valeur**	**Unité**
i_f	$\frac{1}{x_{md}}$	p.u	i_d	0	p.u
i_D	0	p.u	i_q	0	p.u
i_Q	0	p.u	v_f	1	p.u
r_{charge}	1000	p.u	x_{charge}	1000	p.u

La courbe obtenue représente la réponse d'un système de premier ordre (Figure 4-37). La fonction de transfert qui en découle est écrite à l'équation (4.167).

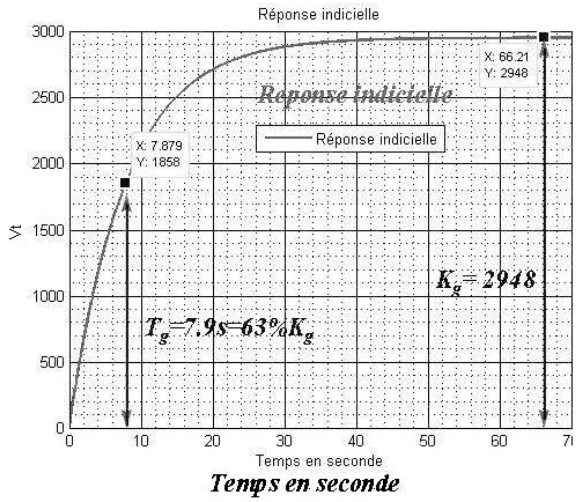


Figure 4-37 : Réponse indicielle de la génératrice v_t pour v_f=1p.u

$$G_g(s) = \frac{2948}{1 + 7,89s} \tag{4.167}$$

Simulation de l'excitatrice

L'excitatrice utilisée est une excitatrice Siemens dont le gain et la constante de temps sont donnés dans le document [37] (Annexe 7). Le résumé les paramètres du système d'excitation est contenu dans le Tableau 4-12. Le mode opératoire consiste à fixer la commande (tension de référence) puis à vérifier que la sortie suit cette dernière. Dans le cadre de cette simulation, nous l'avons fixé à 1 pu. La structure du système d'excitation implantée dans Simulink est donnée en Annexe 9.

Tableau 4-12 : Données du système d'excitation

Paramètres du système d'excitation					
Paramètre	**Valeur**	**Unité**	**Paramètre**	**Valeur**	**Unité**
$K_R = K_r$	1		$T_C = T_F = \tau_F$	0.0001	s
$K_A = K_a$	18.7		$T_A = T_a = \tau_A$	0.0001	s
$K_E = K_e$	-0.08		$T_E = T_e = \tau_E$	0.405	s
$T_G = T_g$	7.89		$K_G = K_g = K_g$	2948	s

Les matrices d'état pour ce système sont :

$$A_{bf} = \begin{bmatrix} -10000 & -17800000 & 0 & 1780000 & -178000 \\ 2.4691 & 0.1975 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 374.5870 & -0.1271 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 & 0 & -10000 \end{bmatrix}; A_{bf} = \begin{bmatrix} 178000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

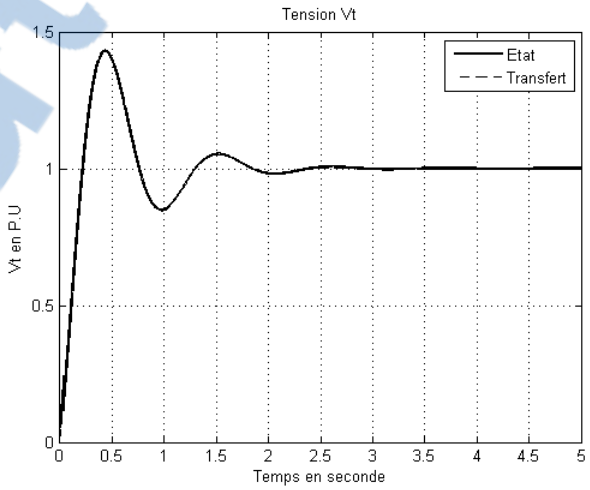
$C_{bf} = I_{5,5}$ et $D_{bf} = 0_{5,1}$.

Les valeurs propres permettent de conclure que le système en boucle fermée est stable, en effet, les parties réelles sont toutes négatives, et les complexes sont conjugués.

$$\lambda_{12} = (-5.0049 \pm 4.3546i)\times 10^3 ; \lambda_3 = (-9.9963)\times 10^3 ;$$

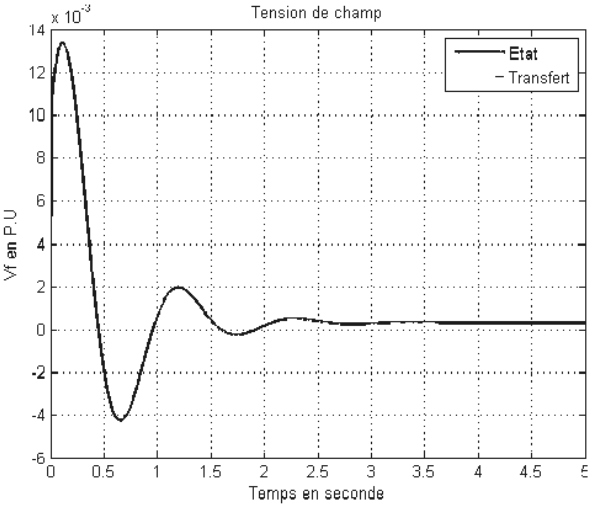
$$\lambda_{45} = (-0.0019 + 0.0058i)\times 10^3 .$$

La simulation se fait pour le modèle avec fonction de transfert et le modèle d'état. La superposition des courbes (Figure 4-38 et Figure 4-39) présente une parfaite concordance entre les deux modèles. Cependant, la réponse est celle d'un système de second ordre. Le premier dépassement est élevé (40 %). Par ailleurs, la valeur finale est atteinte après un temps de 3s en moyenne. Il faut pouvoir améliorer ces manquements. La solution apportée consiste à choisir adéquatement le paramètre K_A à partir de la fonction «rlocus» de Matlab [40]. Les résultats de la Figure 4-39 présentent un dépassement très acceptable de 10 % et un régime transitoire qui dure 0.5 s.



a) tension d'armature v_t

Rapport-Gratuit.com



b) Tension de champ v_f

Figure 4-38 : Tension de sortie (v_t) et de champ (v_f) pour une référence échelon

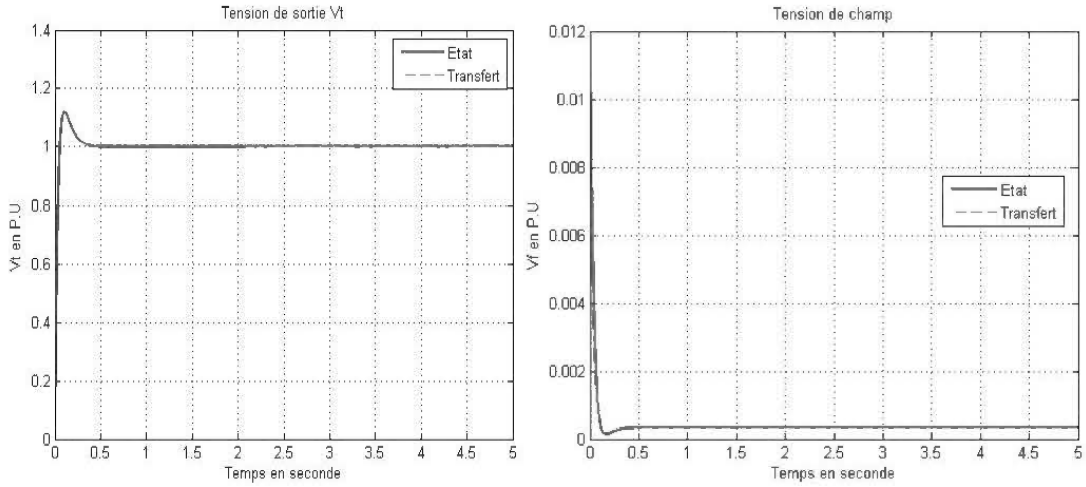
Le choix optimal du gain K_A de la génératrice conduit à la matrice :

$$A_{bf} = \begin{bmatrix} -10000 & -1780000 & 0 & 1780000 & -178000 \\ 2.4691 & 0.1975 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3745.870 & -1.271 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 & 0 & -10000 \end{bmatrix}$$

Les valeurs propres deviennent :

$$\lambda_{12} = \left(-5.0050 \mp 4.3154i\right)\times 10^3 ;; \lambda_3 = -9.9621\times 10^3 ; \lambda_4 = -0.0209\times 10^3 ;$$

$$\lambda_5 = -0.0181\times 10^3$$



a) Tension d'armature v_t **b) Tension de champ v_f**

Figure 4-39 : Tension de sortie (v_t) et de champ (v_f) améliorée

Simulation de l'ensemble génératrice et excitatrice avec régulation de tension

La procédure de simulation consiste à associer à l'excitatrice, la génératrice présentée au paragraphe 4.3.1.2 conformément à la Figure 4-40. Par la suite, effectuer une variation de charge (délestage dans notre cas) et observer le comportement des grandeurs (Tension, courant, puissance) à la sortie de la génératrice.

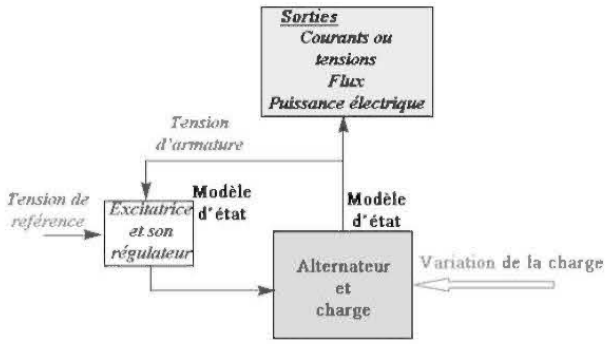


Figure 4-40 : Structure combinée de l'excitatrice et de la génératrice dans Simulink

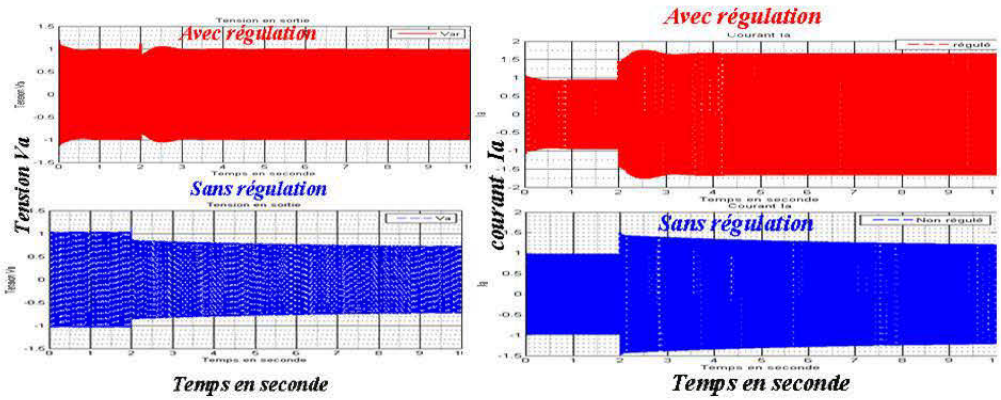
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les structures de l'alternateur et de l'excitatrice dans Simulink sont respectivement données en Annexes 12 et 15.

L'impédance correspondante à la charge nominale est obtenue telle que présentée à l'équation (4.96). Les valeurs correspondantes à la charge nominale sont : $P_t = 1p.u$; $\cos\varphi = 0.95$, $V_t = 1p.u$. Ces valeurs permettent de trouver une impédance $z_{charge} = 1 + 0.3287j$.

Les résultats présentent le système avec et sans régulation.

Sans système d'excitation, on constate une baisse progressive de la tension d'armature (Figure 4-41, Figure 4-42 et Figure 4-43 gauche) pendant les dix secondes que dure la simulation. Cette baisse de tension affecte évidemment le courant de charge. Si la période de simulation est plus longue sans système d'excitation, la tension se stabilisera à une valeur inférieure à la tension nominale. Il en est de même pour la puissance (Figure 4-44) et le courant de champ (Figure 4-43 droite). Avec système d'excitation et régulateur de tension, la génératrice retrouve le nouvel état d'équilibre caractérisé par une tension qui revient à 1 pu (Figure 4-41, Figure 4-42 et Figure 4-43), un nouveau courant d'excitation et d'armature (Figure 4-43 droite) ainsi qu'une nouvelle puissance (Figure 4-44). La période transitoire dure environ 1 seconde.



a) Tension Va **a) Courant Ia**

Figure 4-41 : Tension et courant d'armature dans le repère abc après le délestage

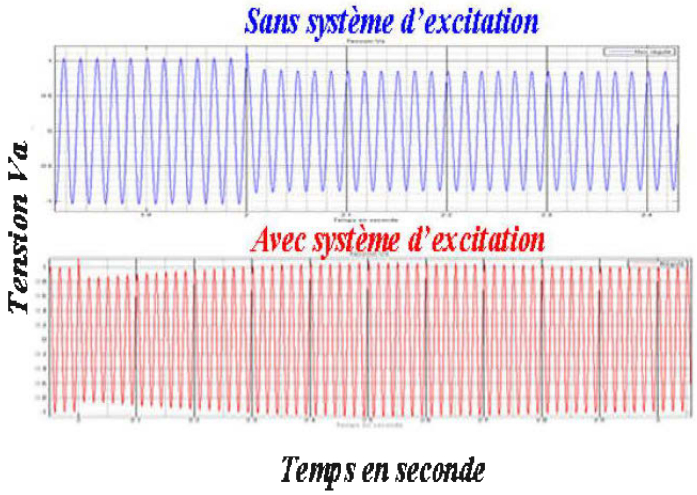
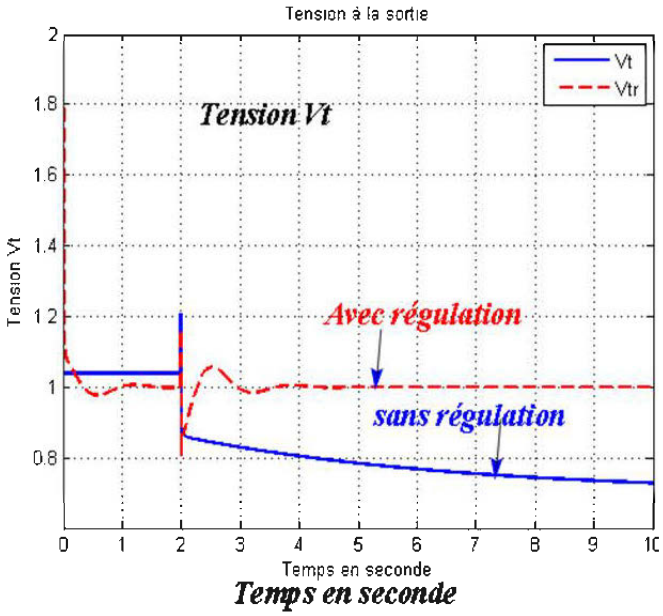
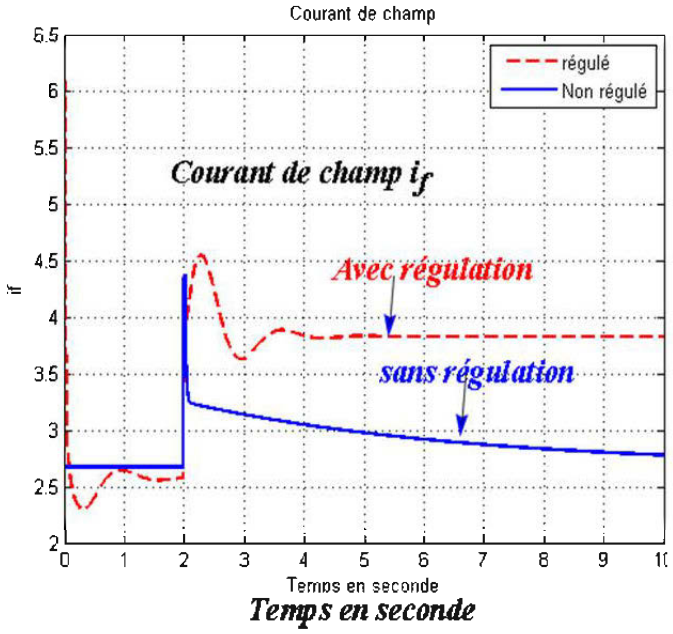


Figure 4-42 : Zoom de la tension d'armature durant la période transitoire



a) Tension v_t



b) Courant Ia

Figure 4-43 : Tension d'armature et courant de champ après le délestage avec et sans système d'excitation

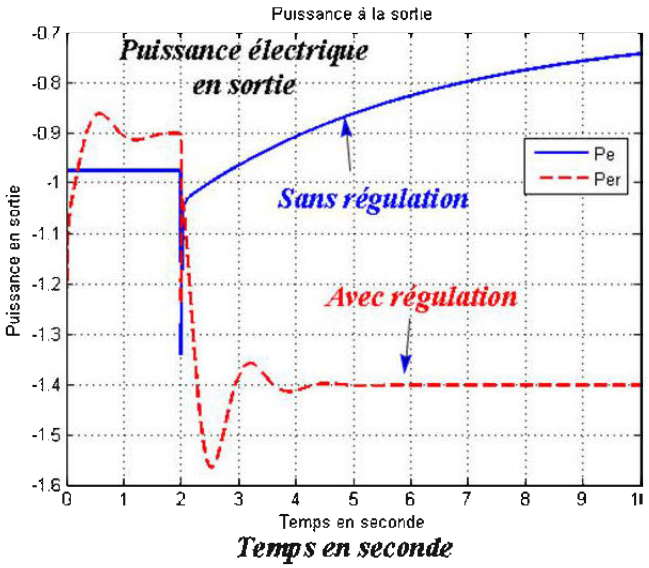


Figure 4-44 : Puissance à la sortie de la génératrice avec et sans régulateur de tension

La génératrice fonctionne toujours avec une vitesse de rotation constante de 1 p.u Cette vitesse est fournie par le système hydraulique et le régulateur de vitesse. La modélisation du régulateur de vitesse est présentée dans la suite.

4.3.2 Modélisation du régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet de maintenir la vitesse turbine-générateur égale à la vitesse synchrone. Il est composé d'un dispositif de mesure de vitesse et d'un mécanisme d'asservissement pour l'ouverture et la fermeture du système de vannage. Ce dispositif décide de la course des servomoteurs. Cette course impose l'angle final (ouverture ou fermeture) des aubes directrices. La position des aubes décide du débit d'eau dans le circuit hydraulique. Ce qui impose une puissance mécanique au niveau de la turbine. Toutes ces variations sont provoquées par un changement de charge à la sortie de la génératrice. La Figure 4-45 présente le régulateur de vitesse dans le système hydraulique.

La spécificité dans ce document est que le modèle présenté est un modèle d'état. Ce modèle est bâti autour du modèle linéaire de la turbine et sera utilisé pour la régulation d'un système non linéaire. C'est un défi majeur qui sera relevé dans le modèle final. Le processus de mise en œuvre est le suivant :

- Les différents blocs sont transformés en modèle équivalent sous forme de fonctions de transfert
- Les fonctions de transfert sont ensuite ramenées dans le domaine temporel d'où découle le modèle d'état

Ce processus est réalisé pour le modèle PID et l'équivalent mécanique du régulateur de vitesse [41, 42]. Ce dernier permet de valider le modèle développé dans ce document.

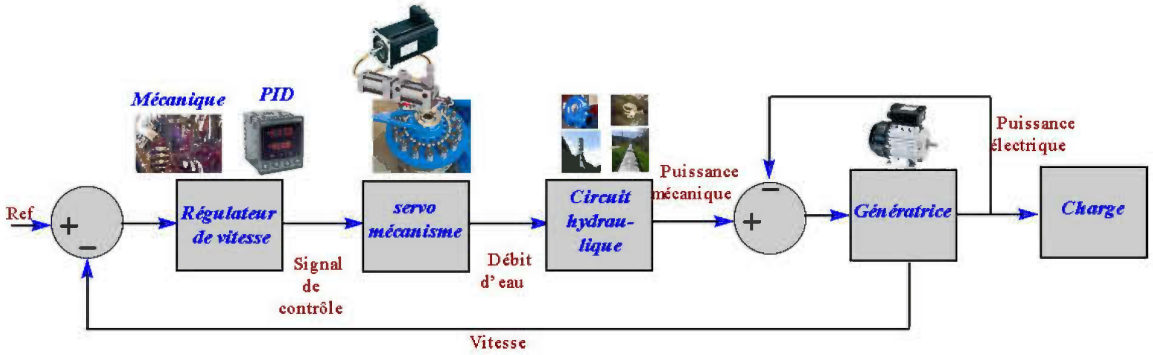


Figure 4-45 : Présentation du régulateur de vitesse

Trois types de régulateurs sont rencontrés dans les centrales hydroélectriques :

- Mécanique (Figure 4-46 et Figure 4-47 [41, 42])
- Accélérométrique ([43])
- PID ([18])

Le fonctionnement du régulateur mécanique ci-dessous permet de comprendre le fonctionnement général des régulateurs dans le système global.

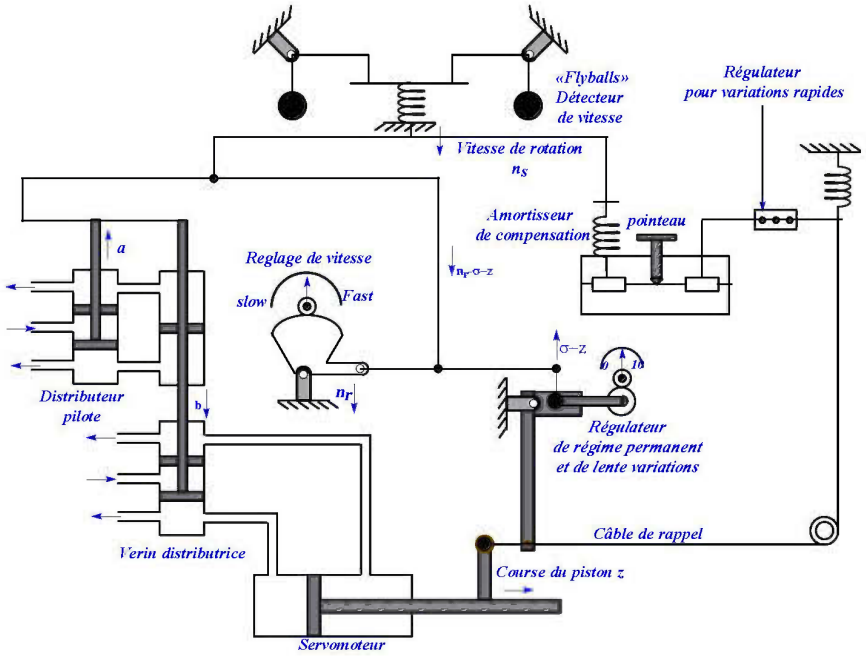


Figure 4-46 : Régulateur mécanique

Le régulateur mécanique comporte une mesure de vitesse effectuée par des masselottes (« flyballs) qui entraînent une valve tiroir appelée valve pilote (« pilot valve »). Cette dernière actionne le circuit hydraulique permettant d'ajouter ou de soustraire de l'huile dans le servomécanisme de positionnement des directrices. Les auxiliaires sont un amortisseur (« compensating dashpot ») qui diminue les excursions en régime transitoire et le statisme (« permanent droop ») permettant une répartition égale de la charge entre les générateurs sur un même réseau. Les éléments du modèle sont la valve pilote représentée par une fonction de transfert du premier ordre, le servomécanisme représenté par un intégrateur, l'amortisseur représenté par une fonction de transfert du premier ordre avec zéro à l'origine et le statisme qui est une rétroaction sous forme de gain entre la sortie (position des directrices) et l'entrée (erreur de vitesse). Le modèle du régulateur de vitesse développé par Ramey et Skooglund (1970) est présenté à la Figure 4-47 [42].

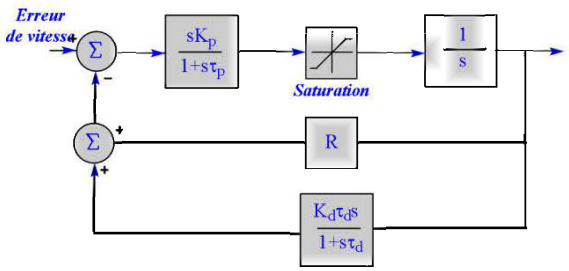


Figure 4-47 : Régulateur mécanique de vitesse

4.3.2.1 *Modèle du régulateur*

Du fait de la réponse inverse de puissance pour une variation au niveau des directrices, les régulateurs des turbines hydrauliques exigent deux correcteurs pour un fonctionnement adéquat [12, 18].

- Une régulation haute pour les variations rapides (faible gain)
- Une régulation normale (haut gain) pour le fonctionnement du système en régime permanent et de faible variation.

Trois modèles de régulateurs sont de ce fait proposés dans les documents [18] dont :

- Les régulateurs proportionnels avec statisme transitoire
- Les régulateurs PID
- Et les régulateurs améliorés utilisés pour le délestage

Hydro-Québec utilise soient les régulateurs de type accélérométriques, soit de type PID. Il est possible de convertir un régulateur accélérométrique (Figure 4-48) en son équivalent PID (Figure 4-49). Les équations de conversion vont de (4.168) à (4.171).

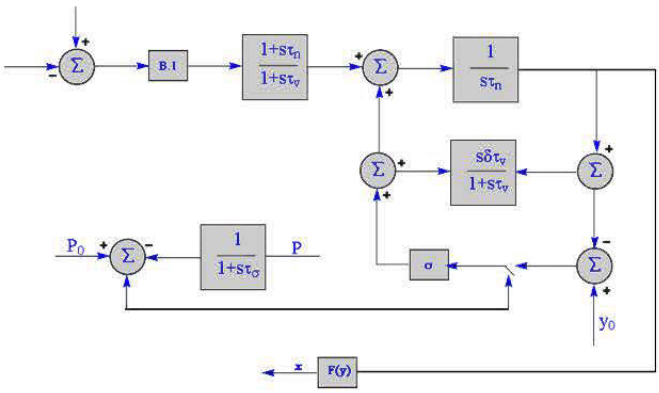


Figure 4-48 : Régulateur accélérométrique

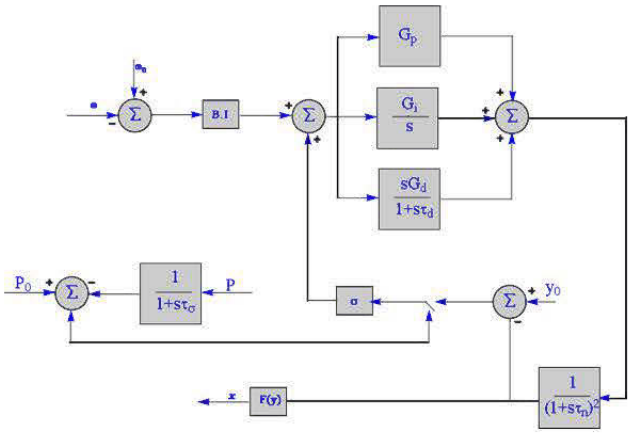


Figure 4-49 : Équivalent PID du régulateur accélérométrique

Les relations de conversion liant ces deux modèles sont données par les équations suivantes [43]:

$$G_p = \left(\frac{1}{\delta}\right)\left[1+\left(\tau_n - \tau_v\right) / \tau_r\right] \tag{4.168}$$

$$G_i = \frac{1}{\delta \tau_r} \tag{4.169}$$

$$G_i = \left(\frac{\tau_n}{\delta}\right) - \left(\tau_v G_p\right) \tag{4.170}$$

$$\tau_v = \tau_d \tag{4.171}$$

Les systèmes isolés utilisent le régulateur de type PID. Pour cette raison, dans la suite, le modèle du régulateur est du type PID. La Figure 4-50 présente un régulateur PID tel que proposé dans le document [22].

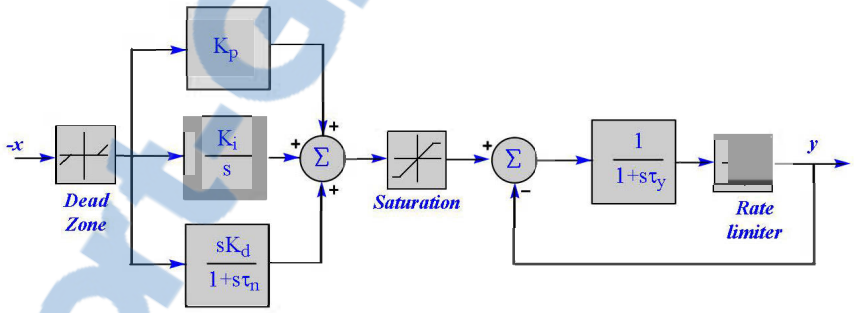


Figure 4-50 : Structure du régulateur PID

Une proposition de détermination des paramètres du régulateur présentée à l'équation (4.172) démontre que ces derniers sont liés au circuit hydraulique [18].

$$\frac{1}{K_P} = \frac{0.625 T_W}{H}; \quad \frac{K_p}{K_I} = 3.33 T_W \quad et \quad \frac{K_p}{K_D} \succ \frac{3}{T_W} \tag{4.172}$$

Avec T_W trouvé au (4.49).

RapportGratuit.com

Dans ce document, partant du modèle de la Figure 4-50, du modèle équivalent de régulateur mécanique proposé dans le document [42], des modèles d'état de régulateur sont développés. Par la suite, le modèle de régulateur pour le simulateur est proposé.

i) Développement du modèle d'état du régulateur mécanique

Le régulateur mécanique peut être facilement converti en un régulateur PI ayant les mêmes performances suivant (4.173) [42]. Pour réaliser le modèle d'état de ce dernier, un circuit complet intégrant le modèle idéal de la turbine et l'équation mécanique de la génératrice est considéré (Figure 4-51).

$$K_{Pm} = 0,4\frac{2H}{T_\omega}; \quad K_{im} = 0,08\,\frac{2H}{T_\omega} \tag{4.173}$$

K_{Pm} *et* K_{im} sont respectivement le gain proportionnel et intégral du régulateur mécanique.

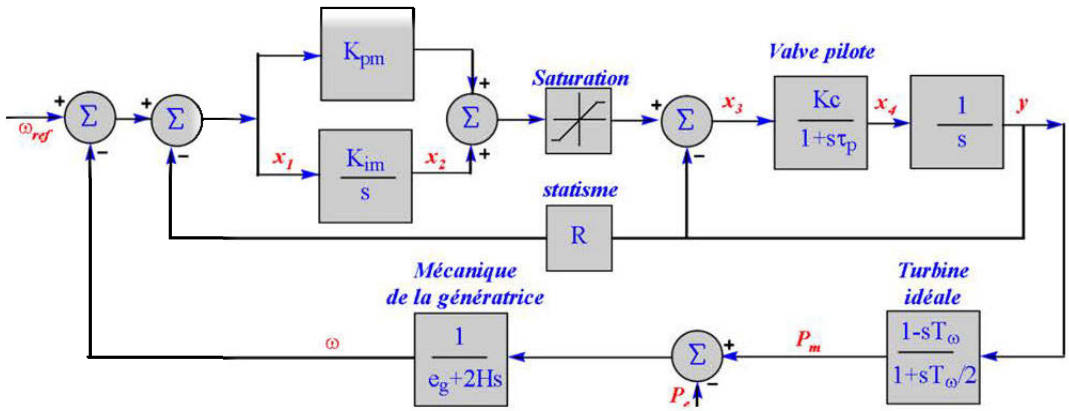


Figure 4-51 : Régulateur PI de vitesse associé à une turbine idéale

Les équations découlant des fonctions de transfert de la Figure 4-51 sont :

- ***Génératrice***

$$\frac{\omega}{P_m} = \frac{1}{2Hs + e_g} \Rightarrow \omega\left(2Hs + e_g\right) = P_m$$
$$\Rightarrow \dot{\omega} = \frac{1}{2H}\left(P_m - e_g\omega\right) \tag{4.174}$$

- ***Régulateur***

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{K_{im}}{s} \Rightarrow \dot{x}_2 = K_{im}x_1 \ avec \ x_1 = \omega_{ref} - \omega - Ry \tag{4.175}$$

$$\Rightarrow \dot{x}_2 = \left(\omega_{ref} - \omega - Ry\right)K_{im} \tag{4.176}$$

D'autre part

$$\frac{x_4}{x_3} = \frac{K_c}{T_p s + 1} \Rightarrow \dot{x}_4 = \frac{1}{T_p}\left(K_c x_3 - x_4\right) \tag{4.177}$$

Avec

$$x_3 = -y + \left(\omega_{ref} - \omega - Ry\right)K_{pm} \tag{4.178}$$

En remplaçant (4.178) dans(4.177), on obtient

$$\dot{x}_4 = -\frac{x_4}{T_p} + \frac{K_C}{T_p}\left[-y + \left(\omega_{ref} - \omega - Ry\right)K_{pm}\right] \tag{4.179}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Aussi

$$\frac{y}{x_4} = \frac{1}{s} \Rightarrow \dot{y} = x_4 \tag{4.180}$$

- ***Turbine***

$$\frac{P_m}{y} = \frac{1 - T_\omega s}{1 + \frac{T_\omega}{2} s} \Rightarrow \dot{P}_m = \frac{2}{T_\omega} y - 2x_4 - \frac{2P_m}{T_\omega} \quad avec\, x_4 = \dot{y} \tag{4.181}$$

Les équations (4.174) à (4.181) ramenées dans le domaine de temporel se résument au système

$$\begin{cases} \dot{y} = x_4 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{2H}\left(P_m - e_g \omega\right) \\ \dot{P}_m = \frac{2}{T_\omega} y - 2x_4 - \frac{2P_m}{T_\omega} \\ \dot{x}_2 = \left(\omega_{ref} - \omega - Ry\right) K_{im} \\ \dot{x}_4 = -\frac{x_4}{T_p} + \frac{K_C}{T_p}\left[-y + \left(\omega_{ref} - \omega - Ry\right) K_{pm}\right] \end{cases} \tag{4.182}$$

Le système (4.182) sous forme de matrice présente le modèle d'état du régulateur PI, équivalent du régulateur mécanique.

$$\begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{\omega} \\ \dot{P}_m \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-e_g}{2H} & \frac{1}{2H} & 0 & 0 \\ \frac{2}{T_\omega} & 0 & -\frac{2}{T_\omega} & 0 & -2 \\ -RK_{in} & -K_{in} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_C}{T_p} & -R\frac{K_C K_{pn}}{T_p} & -\frac{K_C K_{pn}}{T_p} & 0 & \frac{K_C}{T_p} & -\frac{1}{T_p} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \omega \\ P_m \\ x_2 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_{in} \\ \frac{K_C K_{pn}}{T_p} \end{bmatrix} \omega_{ref} \quad (4.183)$$

$$= A_H x + B_H u$$

Les variables d'état y, ω, P_m, x_1, x_2 sont respectivement l'ouverture des directrices, la vitesse de rotation, la puissance mécanique, et des variables de passage. La commande est la vitesse de référence ω_{ref}.

ii) Développement du modèle d'état du régulateur PID

La procédure est la même que précédemment. Le régulateur PID associé à une turbine idéale est donné à la Figure 4-52.

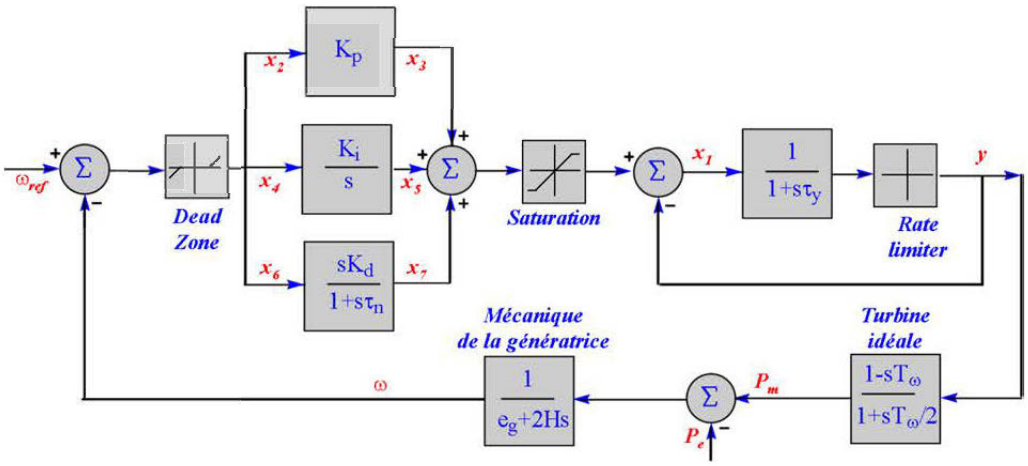


Figure 4-52 : Régulateur PID de vitesse associé à la turbine idéale

Les équations qui découlent de cette figure et ramenées dans le domaine temporel sont les suivantes.

- ***Génératrice***

$$\frac{\omega}{P_m}=\frac{1}{2Hs+e_g}\Rightarrow\omega\left(2Hs+e_g\right)=P_m-P_e\Rightarrow\dot{\omega}=\frac{1}{2H}\left(P_m-\omega e_g\right) \quad (4.184)$$

- ***Régulateur***

$$\frac{x_5}{x_4}=\frac{x_5}{\omega_{ref}-\omega}=\frac{K_i}{s}\Rightarrow\dot{x}_5=\left(\omega_{ref}-\omega\right)K_i \quad (4.185)$$

$$\frac{x_7}{x_6}=\frac{x_7}{\omega_{ref}-\omega}=\frac{sK_d}{1+T_n s} \quad (4.186)$$

En développant(4.186), on obtient :

$$\begin{aligned}
&x_7\left(1+T_n s\right)=\left(\omega_{ref}-\omega\right)sK_d\Rightarrow\frac{x_7}{s}+x_7T_n=\left(\omega_{ref}-\omega\right)K_d\,;\\
&x_8=\frac{x_7}{s}\Rightarrow x_7=\dot{x}_8\\
&\dot{x}_8=\frac{1}{T_n}\left[\left(\omega_{ref}-\omega\right)K_d-x_8\right]
\end{aligned} \quad (4.187)$$

De même

$$\frac{y}{x_1}=\frac{1}{1+T_y s}\Rightarrow\dot{y}=\frac{1}{T_y}\left(x_1-y\right) \quad (4.188)$$

$$x_1=x_3+x_5+x_7-y=K_P\left(\omega_{ref}-\omega\right)+x_5+x_7-y \quad (4.189)$$

(4.189) dans(4.188)

$$\Rightarrow \dot{y} = (x_1 - y)\frac{1}{T_y} = \left(K_P\left(\omega_{ref} - \omega\right) + x_5 + x_7 - y - y\right)\frac{1}{T_y} \qquad (4.190)$$

Puis en remplaçant x_7 par sa valeur $\dot{x}_8$ telle que présentée dans (4.187) puis après réorganisation, on obtient :

$$\dot{y} = \left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right)\omega_{ref} - \left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right)\omega + \frac{x_5}{T_y} - \frac{x_8}{T_y T_n} - \frac{2y}{T_y} \qquad (4.191)$$

- ***Turbine***

$$\frac{P_m}{y} = \frac{1 - T_\omega s}{1 + \frac{T_\omega}{2}s} \Rightarrow P_m\left(2 + T_\omega s\right) = 2y\left(1 - T_\omega s\right) \Rightarrow \dot{P}_m T_\omega = -2P_m + 2y - 2\dot{y}T_\omega$$

$$\Rightarrow \dot{P}_m = \frac{1}{T_w}\left[-2P_m + 2y - 2T_\omega\left(\left(K_P\left(\omega_{ref} - \omega\right) + x_5 + x_7 - y - y\right)\frac{1}{T_y}\right)\right]$$

(4.192)

La réorganisation des équations (4.184) à (4.192) en un système, puis sous forme de modèle d'état donne :

$$\begin{cases} \dot{y} = \left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right)\omega_{ref} - \left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right)\omega + \frac{x_5}{T_y} - \frac{x_8}{T_y T_n} - \frac{2y}{T_y} \\ \dot{P}_m = \frac{1}{T_\omega}\left[-2P_m + 2y - 2T_\omega\left(\left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right)\omega_{ref} - \left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right)\omega + \frac{x_5}{T_y} - \frac{x_8}{T_y T_n} - \frac{2y}{T_y}\right)\right] \\ \dot{\omega} = \frac{1}{2H}\left(P_m - \omega e_g\right) \\ \dot{x}_8 = \frac{1}{T_n}\left[\left(\omega_{ref} - \omega\right)K_d - x_8\right] \\ \dot{x}_5 = \left(\omega_{ref} - \omega\right)K_i \end{cases}$$

(4.193)

Et

$$\begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{P}_m \\ \dot{\omega} \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_5 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{T_y} & 0 & -\left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right) & -\frac{1}{T_y T_n} & \frac{1}{T_y} \\ \frac{2}{T_\omega} + \frac{4}{T_y} & -\frac{2}{T_\omega} & 2\left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right) & \frac{2}{T_y T_n} & -\frac{2}{T_y} \\ 0 & \frac{1}{2H} & -\frac{e_g}{2H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_d}{T_n} & -\frac{1}{T_n} & 0 \\ 0 & 0 & -K_i & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y \\ P_m \\ \omega \\ x_8 \\ x_5 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right) \\ -2\left(\frac{K_P}{T_y} + \frac{K_d}{T_y T_n}\right) \\ 0 \\ \frac{K_d}{T_n} \\ K_i \end{bmatrix} \omega_{ref}$$

$$= A_{PDI}x + B_{PDI}u$$

(4.194)

Les variables d'état restent les mêmes que ceux du modèle mécanique, à la différence des variables de passage qui deviennent x_8 *et* x_5. La commande est la tension de référence.

Simulation

La simulation est faite avec les deux modèles du régulateur. Le modèle d'état PI équivalent mécanique et le modèle d'état PID. Le processus de simulation consiste à fixer la référence (la commande), vérifier que la sortie revient à la référence même après une variation de puissance (délestage dans ce cas). La référence est fixée à 1 P.U.

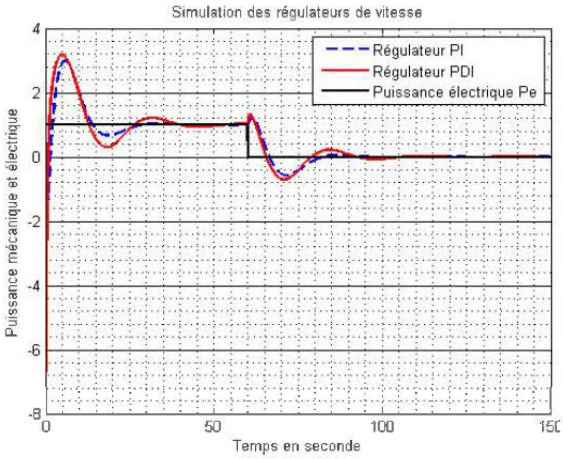
Les données de simulation prises dans le document [18] sont $H = 4, T_{\omega} = 1.83$. Les gains sont obtenus par les équations (4.172) et (4.173). La constante de temps du filtre et du servomoteur sont des valeurs typiques $T_n = 0.05, T_y = 0.5$. La structure du schéma introduit dans Simulink, est donné en Annexe 10 Il faut y ajouter la turbine et la génératrice (Figure 4-45, Figure 4-52). Il faut aussi l'adapter à tous les régulateurs (PI, PID et PID améliorés)

Les valeurs propres des matrices d'états des régulateurs PI et PID sont respectivement :

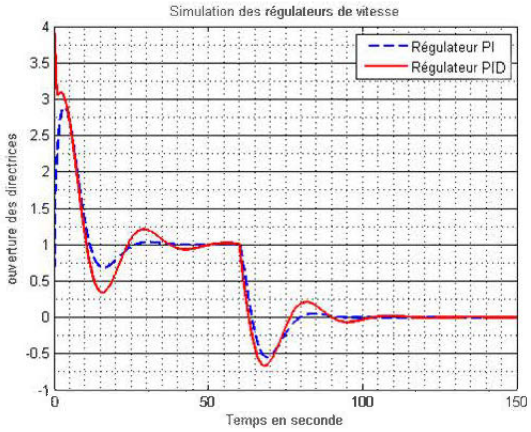
$$\lambda_{12PI} = -10.2382 \pm 3.6040i;\ \lambda_{3PI} = -0.3070;$$
$$\lambda_{4PI} = -0.1548 \pm 0.2196i$$

$$\lambda_{1PDI} = -21.3946;\ \lambda_{2PDI} = -2.6311;\ \lambda_{3PDI} = -0.3070;$$
$$\lambda_{4PDI} = -0.0862 \pm 0.2342i$$

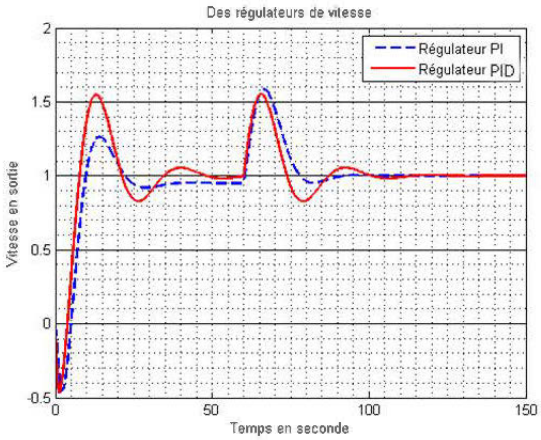
Ces valeurs propres renseignent que les systèmes sont stables.



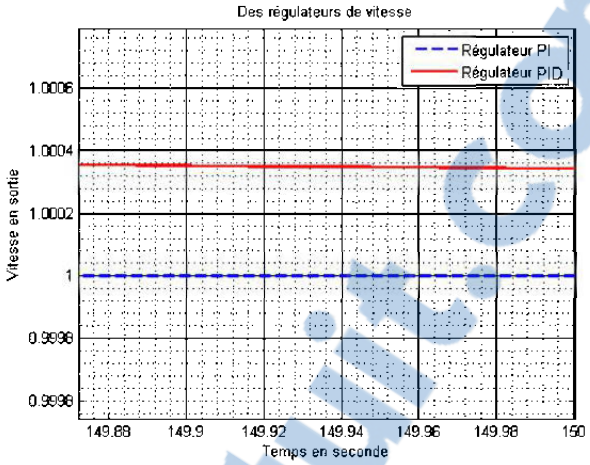
a) Puissance



b) Position des directrices



c) Vitesses



d) Zoom des vitesses

Figure 4-53 : Résultats de simulation du régulateur de vitesse avec le modèle idéal

À la soixantième seconde, la puissance passe de 1 p.u à 0 (Figure 4-53 a). La réaction est immédiatement perceptible au niveau des directrices qui passent à zéro (Fermeture : Figure 4-53 b). Lorsque la puissance active diminue, la vitesse à tendance à augmenter. Cette variation revient à la valeur de consigne après 20 secondes pour le régulateur PI, et 50 secondes pour le régulateur PID. Le dépassement est de l'ordre de 50 % au moment du délestage (Figure 4-53 c). L'erreur statique est plus perceptible pour le régulateur PID. La présence d'un gain proportionnel à la valve pilote permettrait d'améliorer la performance du régulateur PID. En effet, ce gain G permettra de corriger l'erreur statique et d'améliorer le temps de réponse.

L'ajout du gain G permet d'obtenir la Figure 4-54.

Rapport-Gratuit.com

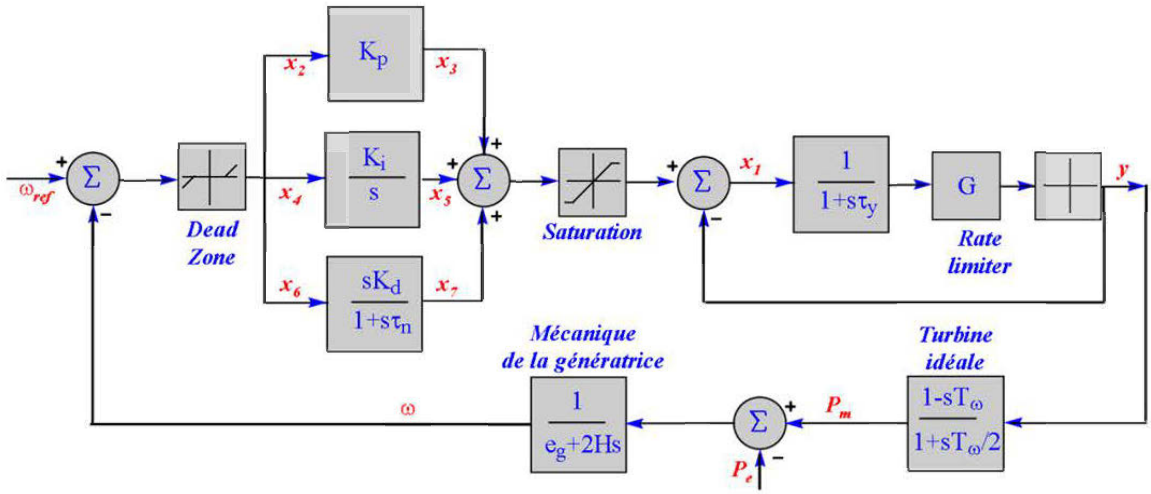


Figure 4-54 : Régulateur PID de vitesse avec gain G associé à la turbine idéale

Le développement des équations reste identique au cas précédent, à la différence que l'équation (4.188) qui devient :

$$\frac{y}{x_1}=\frac{G}{1+T_y s}\Rightarrow \dot{y}=\frac{1}{T_y}\left(Gx_1-y\right) \tag{4.195}$$

Ce qui permet après mise ensemble de toutes les équations et réorganisation d'obtenir :

$$\begin{pmatrix}\dot{y}\\ \dot{P}_m\\ \dot{\omega}\\ \dot{x}_8\\ \dot{x}_5\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{1}{T_y}-\frac{G}{T_y} & 0 & -\left(\frac{GK_p}{T_y}+\frac{GK_d}{T_yT_n}\right) & -\frac{G}{T_yT_n} & \frac{G}{T_y}\\ \frac{2}{T_\omega}+\frac{2}{T_y}+\frac{2G}{T_y} & -\frac{2}{T_\omega} & 2\left(\frac{GK_p}{T_y}+\frac{GK_d}{T_yT_n}\right) & \frac{2G}{T_yT_n} & -\frac{2G}{T_y}\\ 0 & \frac{1}{2H} & -\frac{e_g}{2H} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -\frac{K_d}{T_n} & -\frac{1}{T_n} & 0\\ 0 & 0 & -K_i & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{pmatrix}y\\ P_m\\ \omega\\ x_8\\ x_5\end{pmatrix}+\begin{bmatrix}\left(\frac{GK_p}{T_y}+\frac{GK_d}{T_yT_n}\right)\\ -2\left(\frac{GK_p}{T_y}+\frac{GK_d}{T_yT_n}\right)\\ 0\\ \frac{K_d}{T_n}\\ K_i\end{bmatrix}\omega_{ref} \tag{4.196}$$

Le résultat de simulation est celui de la Figure 4-56. Le processus est identique au cas précédent. Les valeurs des gains sont :

Pour le régulateur PID et PID avec gain.

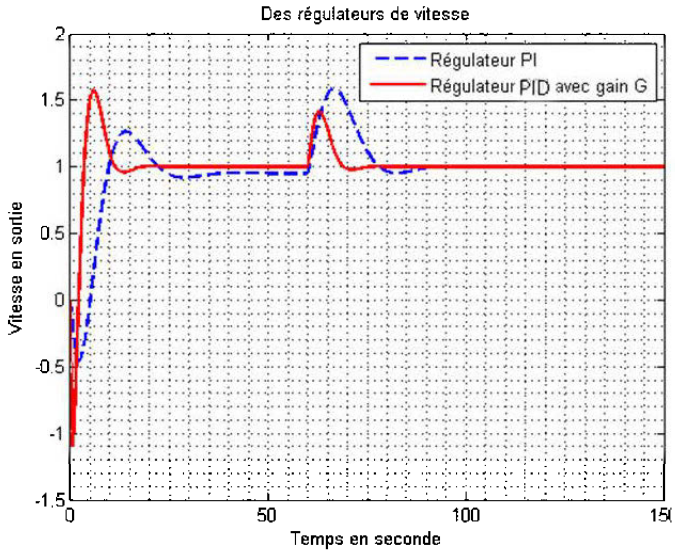
$$K_p = 3.4937,\ K_I = 0.5739,\ K_D = 2.2333, G = 10$$

Pour le régulateur PI.

$$K_{pm} = 1.7486,\ K_{Im} = 0.1911,\ K_c = 5$$

a) PID avec et sans gain G

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



b) PI et PID avec gain G

Figure 4-55 : Simulation des résultats du régulateur PID amélioré

Le résultat est très satisfaisant au niveau du temps de réponse qui passe de 50 à 15 secondes. Aussi, le pique au délestage atteint approximativement 41 %. Ce qui est meilleur que les 60 % du régulateur PID non amélioré. De plus, l'erreur statique est annulée, le régulateur est plus fidèle. Cependant, en agissant convenablement sur l'action dérivée, on améliore considérablement le régulateur. En effet, tel qu'indiqué à l'équation (4.172) $\frac{K_p}{K_D} \succ \frac{3}{T_W}$.

Pour $K_p = 3.4937$, $K_I = 0.5739$, $K_D = 3.0333$, $G = 10$, les résultats du modèle avec gain et sans gain sont présentés à la Figure 4-56. Ces résultats sont satisfaisants, car le dépassement est largement amélioré (30 %) et le temps de réponse reste à 15 secondes.

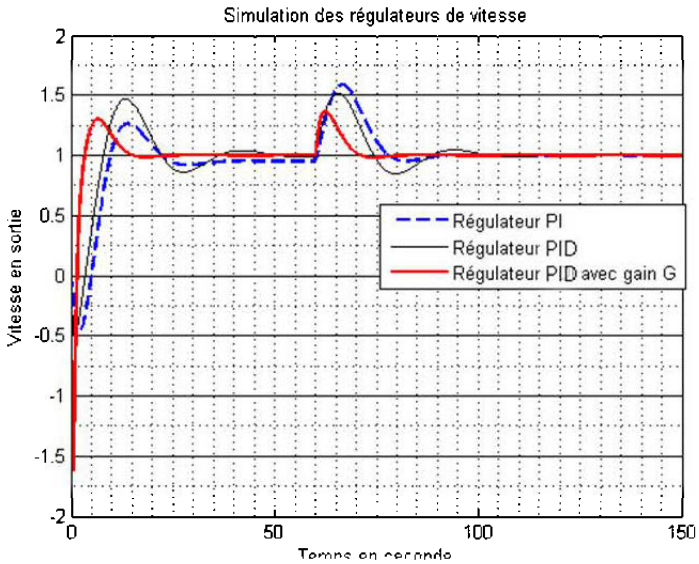


Figure 4-56 : Simulation du régulateur de vitesse amélioré

4.4 Conclusion

Ce chapitre présente le gros de ce travail de recherche. La plupart des apports s'y trouvent. Les processus sont présentés. Les équations ainsi que les programmes (en annexe) sont explicites. La procédure de rédaction permet au lecteur de refaire facilement et de comprendre sans ambiguïté les développements. Cependant. L'un des plus gros défis reste la mise en commun de tous ces sous-ensembles. C'est l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 5

MISE EN COMMUN DES DIFFÉRENTS SOUS-ENSEMBLES : MODÈLE FINAL

Le chapitre précédent a permis de réaliser le modèle pour chaque partie du simulateur. L'objectif du présent chapitre est de mettre en commun toutes ces parties. Dans un premier temps, le modèle final du simulateur numérique est présenté. Par la suite les données utilisées pour la simulation du modèle global sont aussi présentées. Les résultats et commentaires terminent ce chapitre.

5.1 Structure finale du simulateur numérique

Le simulateur numérique final est constitué de quatre blocs.

- Le régulateur de vitesse représenté par son modèle d'état
- Le système d'excitation représenté par son modèle d'état
- La machine synchrone et la charge représentées par le modèle d'état non linéaire pour la partie électrique et de la charge, puis, par la fonction de transfert pour la partie mécanique
- Le circuit hydraulique représenté par le modèle d'état de la conduite forcée et le modèle non linéaire de la turbine

Le système global est présenté à la Figure 5-1. Ce dernier présente par ailleurs les différentes sorties qui pourront être observées pendant les simulations.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

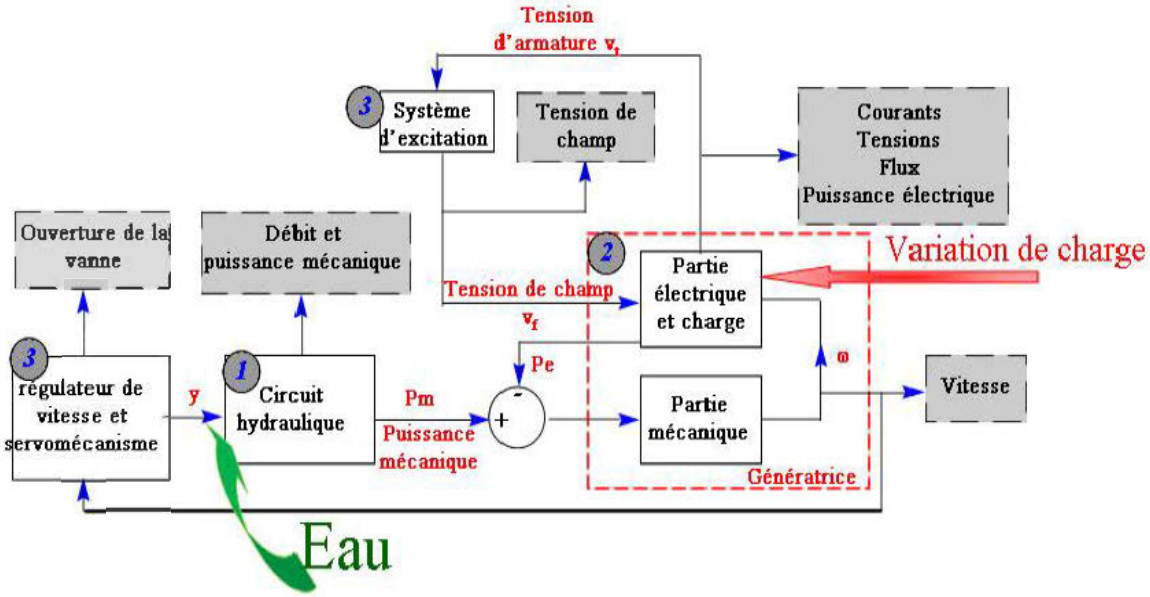


Figure 5-1 : Structure finale du simulateur numérique

Sous forme de modèles utilisés, le schéma est présenté à la Figure 5-2.

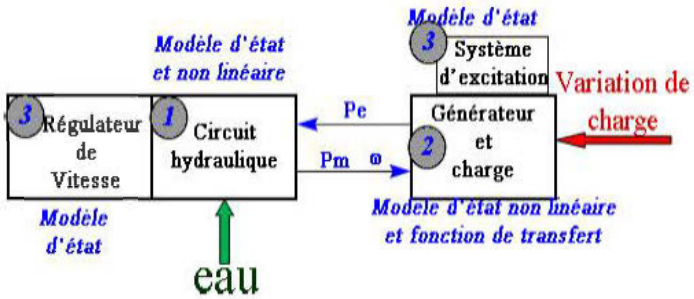


Figure 5-2 : Présentation du simulateur en fonction des modèles utilisés pour chaque sous-ensemble

Implémentée dans Simulink, la structure globale est la suivante

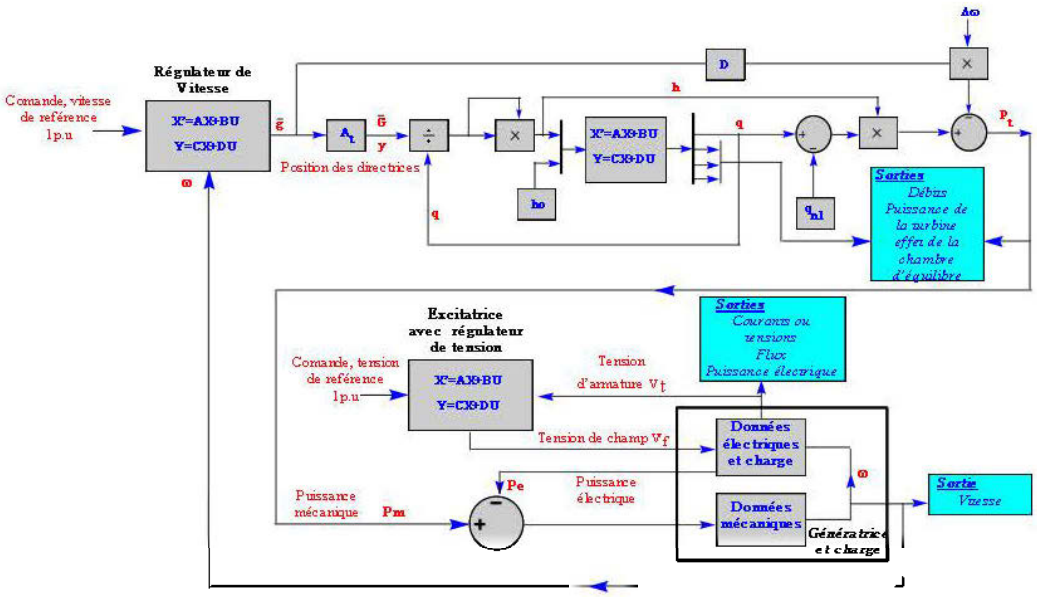


Figure 5-3 : Structure du simulateur numérique dans Simulink

Les différents blocs ainsi que les programmes qui les accompagnent sont illustrés en Annexes 8 à 12.

5.2 Données de simulation

5.2.1 Le circuit hydraulique

La centrale LG2 abrite 16 groupes hydroélectriques alimentés chacun par une conduite forcée individuelle. Elle est divisée en deux démis centrales de huit groupes [43]. Les données du groupe huit utilisées pour cette simulation sont contenues dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Données du groupe 8 LG2 Robert Bourassa

Conduite forcée			
Grandeurs	Symboles	Robert-Baroussa2	Simulateur
Surface à l'entrée de la prise d'eau	$A_{h_1}\left(m^2\right)$	139.080	
Longueur de la prise d'eau	$L_{h_{12}}\left(m\right)$	17.58	
Longueur de la partie cylindrique	$L_{h_{23}}\left(m\right)$	120.43	
Longueur entre la partie cylindrique et la bâche spirale	$L_{h_{34}}\left(m\right)$	59.44	
Diamètre de la partie cylindrique	$D_h\left(m\right)$	7.9	
Diamètre à l'entrée de la bâche spirale	$D_{v_1}\left(m\right)$	6.096	
Vitesse de propagation de l'onde	$a_h\left(m/s\right)$	1243.966	
Surface à l'entrée de l'aspirateur	$A_{d_1}\left(m^2\right)$	25.41	
Surface à la sortie de l'aspirateur	$A_{d_2}\left(m^2\right)$	110.732	
Longueur moyenne de l'aspirateur	$L_d\left(m\right)$	53.0	
Vitesse de propagation de l'onde de dépression	$a_d\left(m/s\right)$	1244.031	

Cette conduite est composée de trois parties de longueurs, de diamètres et de formes différentes (Figure 5-4).

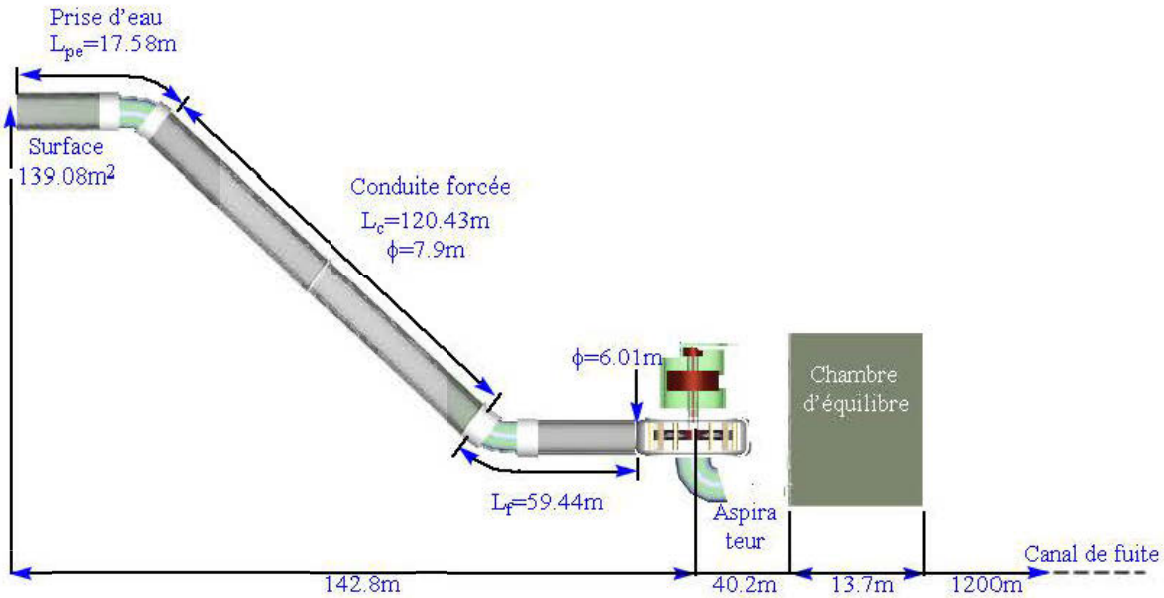


Figure 5-4 : Structure du groupe #8 LG2

Les formules (5.1) et (5.2) permettent de ramener les différentes sections à des cylindres équivalents de mêmes diamètres.

- Pour une conduite cylindrique de longueur L et de diamètre D; la conduite cylindrique équivalente de diamètre D_n et de longueur L_n est :

$$L_n = L\frac{D_n^2}{D^2} \tag{5.1}$$

- Pour un tronc de cône de diamètre d'entrée D_e et de sortie D_s, le conducteur équivalent est :

$$L_n = L\frac{D_n^2}{D_e D_s} \tag{5.2}$$

La longueur totale de la conduite forcée est la somme des trois longueurs ainsi définies.

Le diamètre de référence choisi est celui de la partie cylindrique. Soit $D_n = 7.9$.

Les données finales pour la conduite forcée sont contenues dans le Tableau 5-2

Tableau 5-2 : Données finales de la conduite forcée

Données finales de la conduite forcée			
Grandeur	**Symbole**	**Robert Broussa 2**	**Sinnulateur**
Longueur	$L(m)$	207.8968 m	
Hauteur	$H(m)$	165m	
diamètre	$D(m)$	7.9m	
Débit nominal	$Q_n(m^3/s)$	261.720m^3/s	
Coefficient de friction	f	0.01	

Tableau 5-3: Données de la turbine

Turbine			
Grandeurs	Symboles	Robert-Broussa2	Simulateur
Puissance mécanique nominale	$P_m(MW)$	340	
Débit	$Q(m^3/s)$	261.720	
Débit à vide	$Q_{nl}(m^3/s)$		
Débit en pleine charge	$Q_{fl}(m^3/s)$		
Vitesse nominale	$\Omega_n(tr/\min)$	133.33	
Moment d'inertie des masses tournantes	$J(Kg.m^2)$	15.675x10^6	
Coefficient d'amortissement	D_t	0.5	

Rapport-Gratuit.com

Tableau 5-4: Données du fluide

Eau			
Grandeurs	Symboles	Robert-Broussa2	Simulateur
Densité de l'eau	$\rho\left(Kg/m^3\right)$	998.8	
Viscosité de l'eau	$\mu(Pa)$	$112.9\text{x}10^{-5}$	
Accélération de la gravité	$g\left(m/s^2\right)$	9.81	
Vitesse de propagation de l'onde	$a_f\left(m/s\right)$	1243.966	

Tableau 5-5: Caractéristiques de la vanne

Vanne			
Appareil	**Symbole**	**Robert Broussa 2**	**Simulateur**
Vanne	Ouverture pour une charge nominale	0.94p.u	
	Ouverture à vide	0.06p.u	
Eau	Débit nominal	$261.720\text{m}^3/\text{s}$	

5.2.2 La génératrice et la charge

Les caractéristiques de la génératrice sont celles des Tableau 4-8 et 4-9. La Figure 5-5 présente la structure adoptée pour la charge. Les valeurs sont calculées en tenant compte du type de charge (inductive, capacitive, résistive). Pour cela, on choisit le facteur de puissance désiré. Ensuite, les valeurs sont déterminées à partir de l'équation (5.3) pour le courant et la puissance réactive et l'équation (4.96) pour la résistance et la réactance de charge. La tension terminale est égale à l'unité, étant donné qu'elle est maintenue fixe par le régulateur de tension et le système d'excitation. Les données de la charge en fonction des essais sont présentées avant les résultats de simulation du cas considéré.

$$I_t = \frac{P_t}{\cos\varphi};\ Q_t = P_t \tan\varphi \qquad (5.3)$$

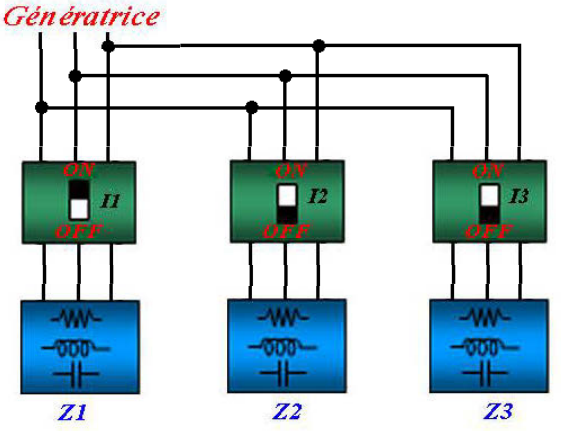


Figure 5-5 : Charges

Les interrupteurs I1, I2, et I3 permettent de réaliser soit un délestage, soit un enclenchement de charge.

5.2.3 Le circuit de contrôle

Les caractéristiques du système d'excitation sont contenues dans le Tableau 4-12. Ceux du régulateur de vitesse sont : $K_p = 3.4937$, $K_I = 0.5739$, $K_D = 3.0333$, $G = 10$, $T_n = 0.05$, $T_y = 0.5$

Simulations

À partir du modèle global du simulateur présenté par la Figure 5-1 et la Figure 5-2 dont les détails sont illustrés en annexe, on réalise une succession d'opérations telles que présentées à la Figure 5-6.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

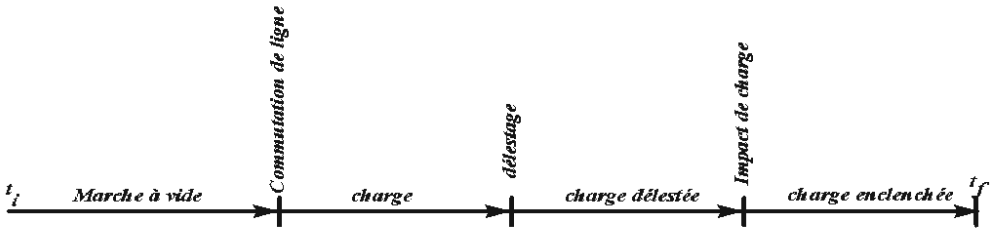


Figure 5-6 : Opérations pendant les essais.

5.3 Mode opératoire et attentes

5.3.1 Mode opératoire

Le principe de délestage est expliqué dans le document [44]. Initialement, au moins deux interrupteurs sont fermés. Le système fonctionne en régime permanent. Par la suite, un ou deux des interrupteurs sont ouverts selon les besoins. Le délestage entraine une chute de courant d'un pourcentage $\alpha\%$. La tension terminale subit une brève variation et revient à la valeur nominale grâce à l'action du système d'excitation. Il en est de même pour la vitesse de rotation dont le rétablissement est assuré par le régulateur de vitesse et le dispositif de vannage.

L'enclenchement consiste à mettre un ou plusieurs interrupteurs en marche partant d'un fonctionnement à vide (Commutation sur une charge), ou d'un fonctionnement sur une charge définie. L'augmentation de charge est aussi estimée par un pourcentage $\beta\%$.

5.3.2 Les attentes

Idéalement on aimerait que les différentes données du simulateur soient conformes au schéma de Figure 5-7, suite aux variations de la Figure 5-6. Cependant, toute variation entraine un régime transitoire. De plus le système ne peut être idéal. Le comportement réel attendu du système inclut donc des périodes transitoires.

De ce fait, la réaction générale du système consiste à maintenir la tension et la vitesse de rotation à leur valeur nominale. Ceci est une action combinée des régulateurs de vitesse et du système d'excitation. Toute diminution de puissance active se traduit à l'instant de diminution par une augmentation de la vitesse, une diminution de la puissance mécanique, de l'ouverture des directrices et du débit d'écoulement. La hauteur varie autour de l'unité (sa valeur en p.u) diminuée des pertes. L'action est contraire pour une augmentation de puissance en sortie. La variation du courant d'excitation dépend de la quantité d'énergie réactive en sortie. Ce dernier augmente ou diminue de façon à compenser le besoin en énergie réactive appelé par la charge. Ces deux grandeurs varient dans le même sens. La tension de champ varie avec le courant d'excitation dans le même sens. Il est primordial de noter que les délais d'ajustement des régulateurs de vitesse tels que présentés dans les simulations des systèmes hydrauliques suite à des variations de charge peuvent prendre une dizaine de secondes [18, 22, 29]. Cependant, la vitesse reste dans une marge acceptable par rapport à la fréquence d'utilisation de l'énergie électrique en sortie.

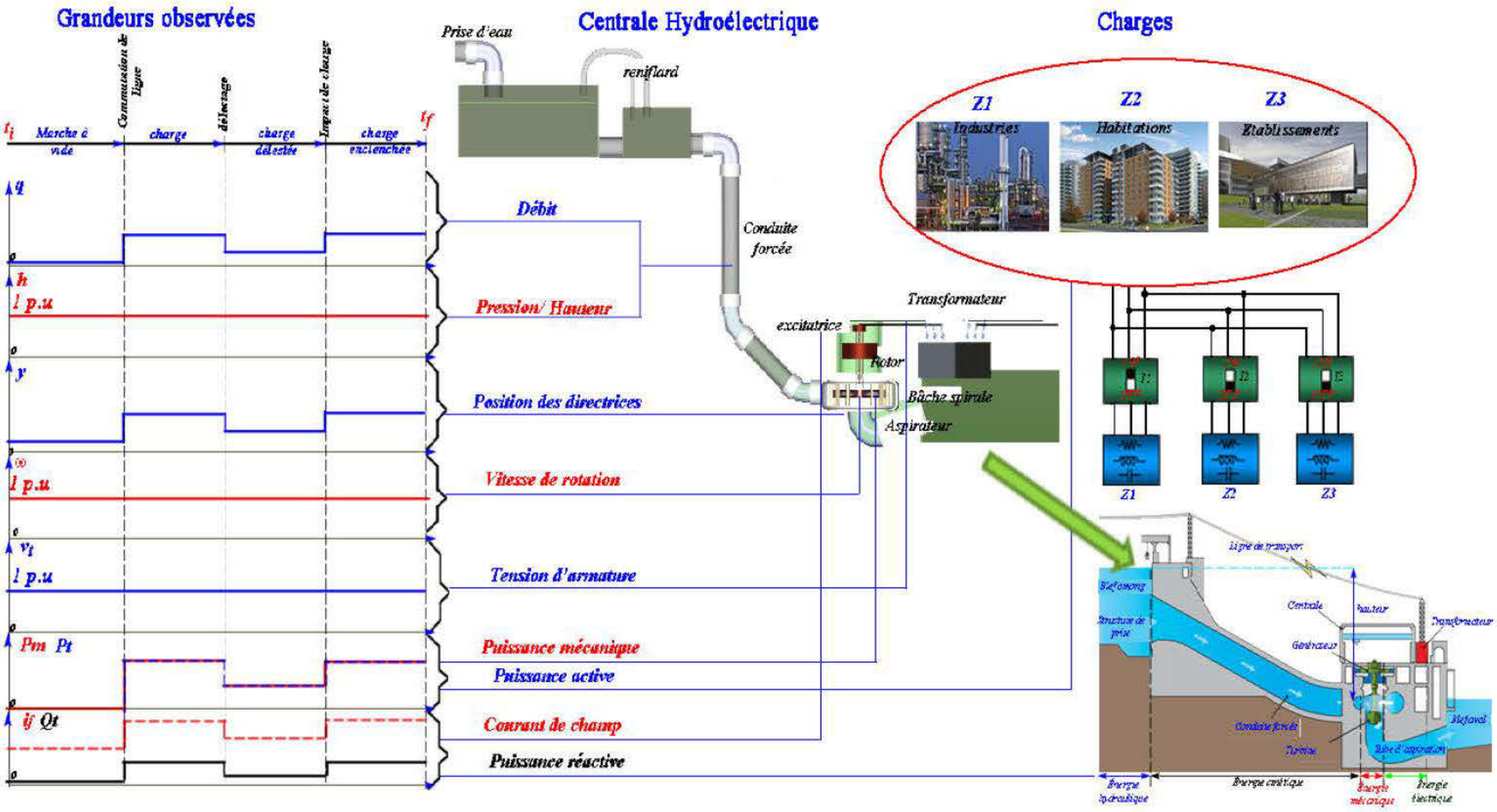


Figure 5-7 : Les attentes pour un comportement idéal

5.3.3 Simulation

Le processus des essais illustré par la Figure 5-6 est le même pour les trois types de charge. Les résultats du système sont présentés en totalité pour le cas d'une charge inductive. Étant donné que les commentaires et remarques sont identiques dans le cas des autres types de charges pour certains résultats, il ne sera présenté que ceux utiles dans les cas d'une charge résistive et capacitive.

Pour une valeur d'impédance de charge $z_c = 1000 + 1000j$ pu, les matrices d'état et les valeurs propres des différents blocs sont les suivantes.

Excitatrice

$$A_{bf} = \begin{bmatrix} -10000 & -1780000 & 0 & 1780000 & -178000 \\ 2.4691 & 0.1975 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3745.870 & -1.2706 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 & 0 & -10000 \end{bmatrix}$$

Les valeurs propres sont :

$$\lambda_1 = (-5.0050 + 4.3154i) \times 10^3; \qquad \lambda_2 = (-5.0050 - 4.3154i) \times 10^3;$$

$$\lambda_3 = -9.9621 \times 10^3; \lambda_4 = -0.0209 \times 10^3; \lambda_5 = -0.0181 \times 10^3$$

Conduite forcée

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -71.5353 & -0.0028 & 71.5353 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 71.5353 & 0 & -71.5353 & -0.0028 \end{bmatrix}$$

Valeurs propres

$$\lambda_{c1} = \text{-}0.0014 + 11.9612\text{i};\ \lambda_{c2} = \text{-}0.0014 - 11.9612\text{i};\ \lambda_{c3} = -0.0000;\ \lambda_{c4} = \text{-}0.0028$$

Régulateurs de vitesse

$$A_{rvn} = \begin{bmatrix} -22 & 0 & \text{-}1368.8 & -400 & 20 \\ 48.4376 & \text{-}4.4376 & 2737.6 & 800 & -40 \\ 0 & 0.1042 & \text{-}1.0417\times10^{-7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{-}51.4000 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & \text{-}11.3543 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les valeurs propres sont :

$$\lambda_{r1} = \text{-}38.2387;\ \lambda_{r2} = \text{-}4.2137;\ \lambda_{r3} = \text{-}1.0545 \pm 2.4150\text{i};$$
$$\lambda_{r5} = \text{-}1.8764$$

Génératrice :

Matrice d'état pour le fonctionnement à vide.

$$A_{genv} = \begin{bmatrix} \text{-}0.3769 & 0.3772 & \text{-}0.0000 & 0.0000 & \text{-}0.0001 \\ \text{-}0.3772 & \text{-}0.3769 & 0.0002 & 0.0002 & \text{-}0.0000 \\ \text{-}1.0037 & 1.0044 & \text{-}0.0035 & 0.0428 & \text{-}0.0004 \\ 0.5661 & \text{-}0.5665 & 0.0032 & \text{-}0.0402 & 0.0002 \\ \text{-}0.4526 & \text{-}0.4522 & 0.0003 & 0.0003 & \text{-}0.0167 \end{bmatrix} \times 10^{3}$$

Les valeurs propres sont :

$$\lambda_{genv1} = \left(-3.7690 \mp 3.7699i\right)\times 10^2;\ \lambda_{genv3} = -0.4362\times 10^2;$$
$$\lambda_{genv4} = -0.0013\times 10^2\ ;\ \lambda_{genv5} = -0.1668\times 10^2$$

Les valeurs propres des différentes matrices démontrent un fonctionnement stable à vide. Il est important de remarquer que la charge influence sur la matrice d'état initiale de la génératrice. Cette matrice est plus variable pendant le fonctionnement lorsque la saturation est prise en compte.

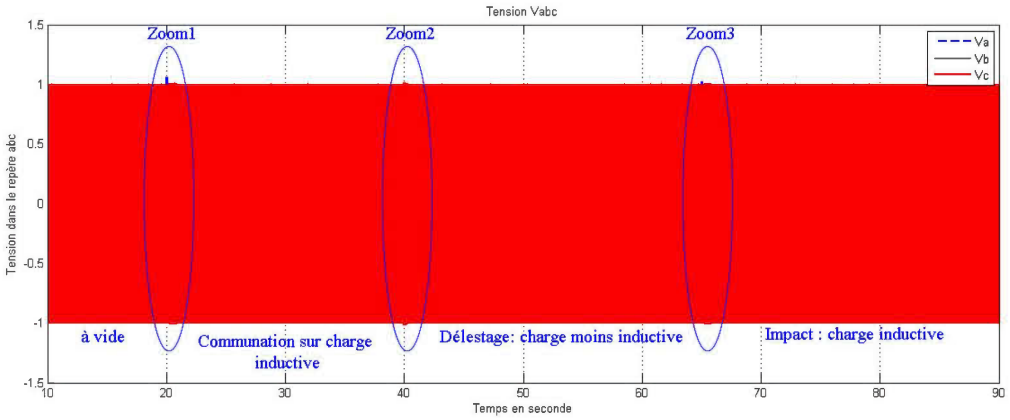
- ***Résultats pour une charge inductive***

Les valeurs utilisées dans la simulation de la charge inductive sont présentées dans le Tableau 5-6.

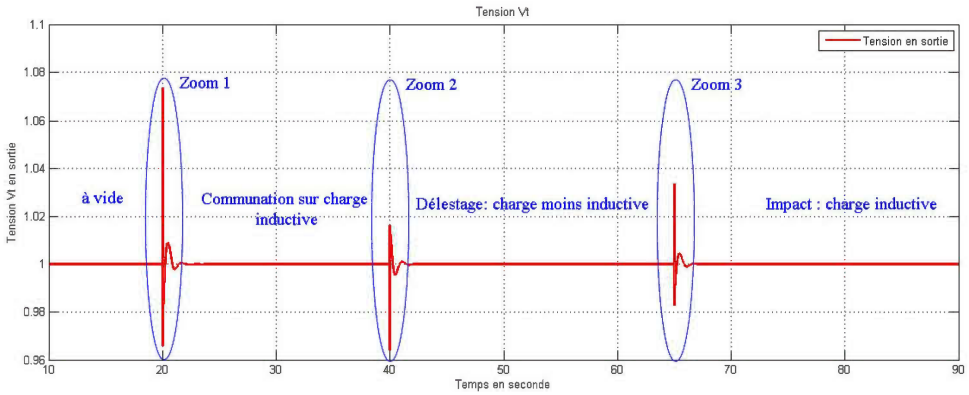
Tableau 5-6 : Données de sinnulation d'une charge inductive

Sinnulation	Impédance		Cosφ	Puissance	
	Résistive p.u	Réactive p.u		Active	réactive
À vide	1000	1000		0.0005	0.0005
Charge inductive	5	5.3	0.70	0.0942	0.1
Après délestage	10	9	0.74	0.0553	0.0497
Après enclenchement de charge	5	5.3	0.70	0.0942	0.1

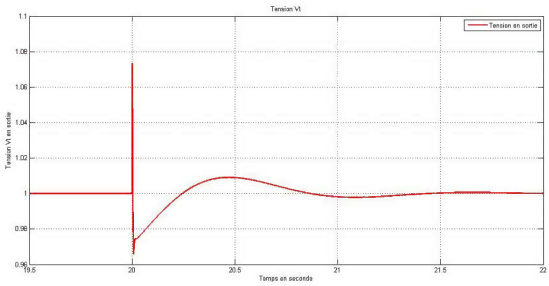
Les tensions (Génératrice : Partie électrique et excitatrice)



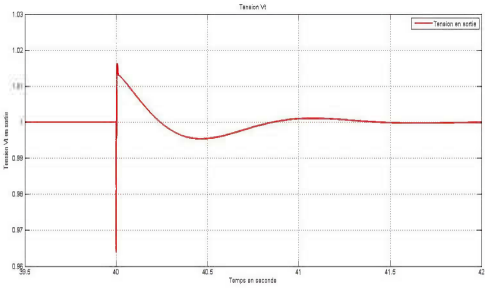
a) Tension dans le repère abc



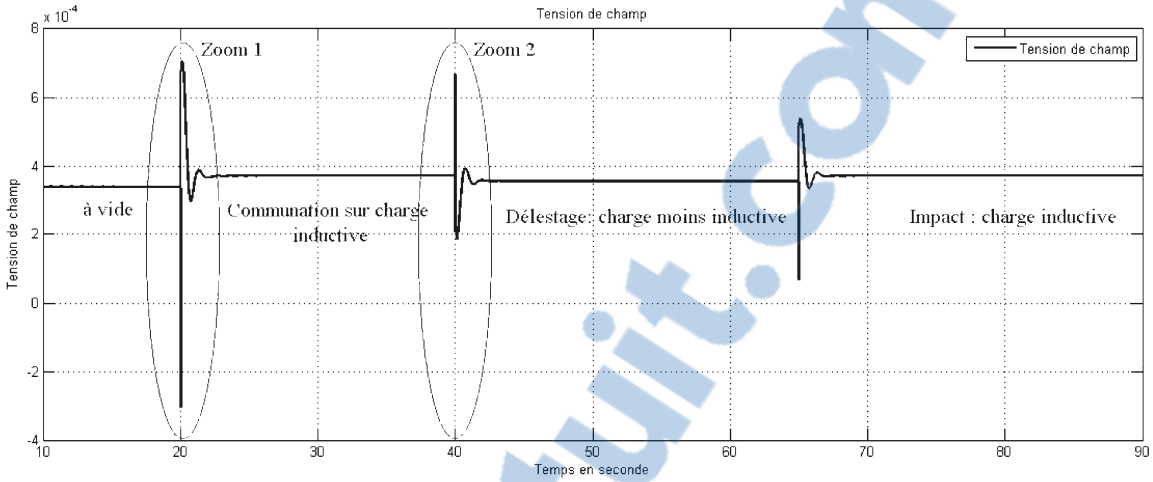
b) Tension v_t en pu



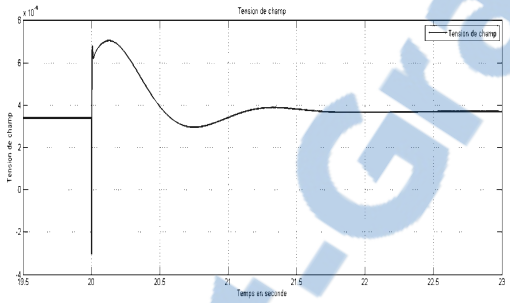
c) v_t Zoom 1



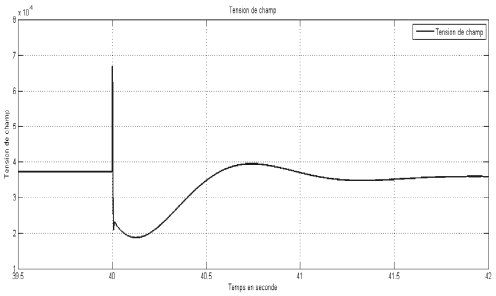
d) v_t Zoom 2



f) Tension de champ v_f en p.u



g) v_f Zoom 1



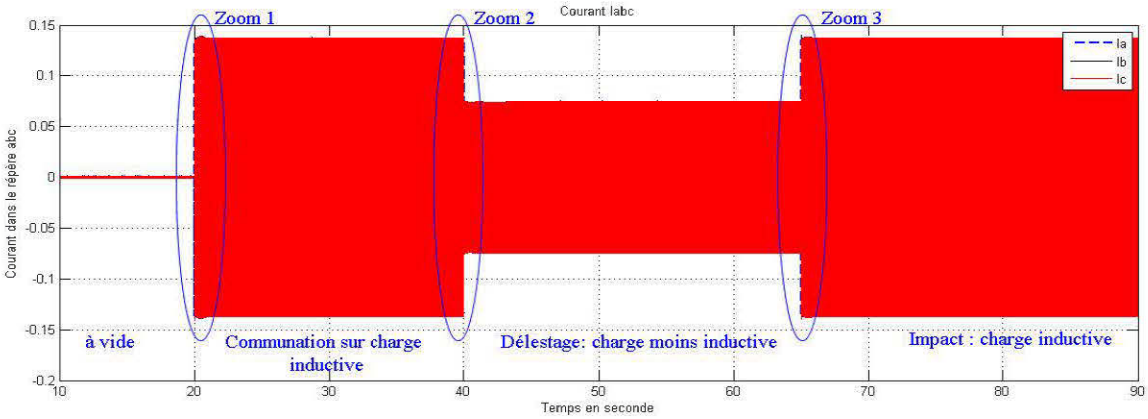
h) v_f Zoom 2

Figure 5-8 : Les tensions

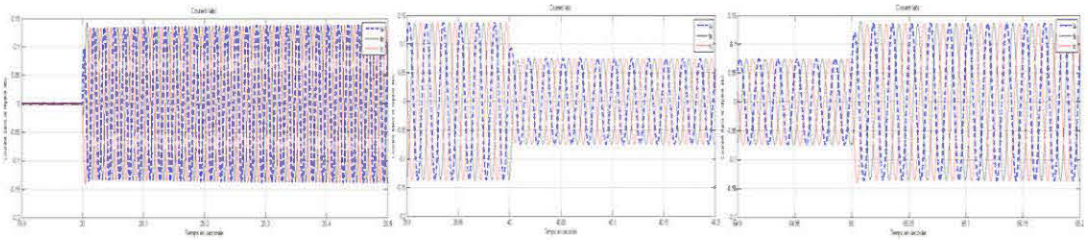
La tension d'armature en p.u, varie et revient à l'unité (Figure 5-8 a et b). Le temps de rétablissement est d'environ 1.5s. Ensuite, la tension oscille faiblement autour de la valeur nominale avant de se stabiliser à son régime permanent. La commutation ou l'impact de charge provoquent une légère augmentation de tension après la brusque pique (Figure 5-8 b et c) alors que le délestage provoque une légère baisse de la tension terminale après le brusque pic (Figure 5-8 b et d). La tension de champ oscille faiblement et se rétablit à la nouvelle valeur pendant les opérations (Figure 5-8 f, g et h).

Rapport-Gratuit.com

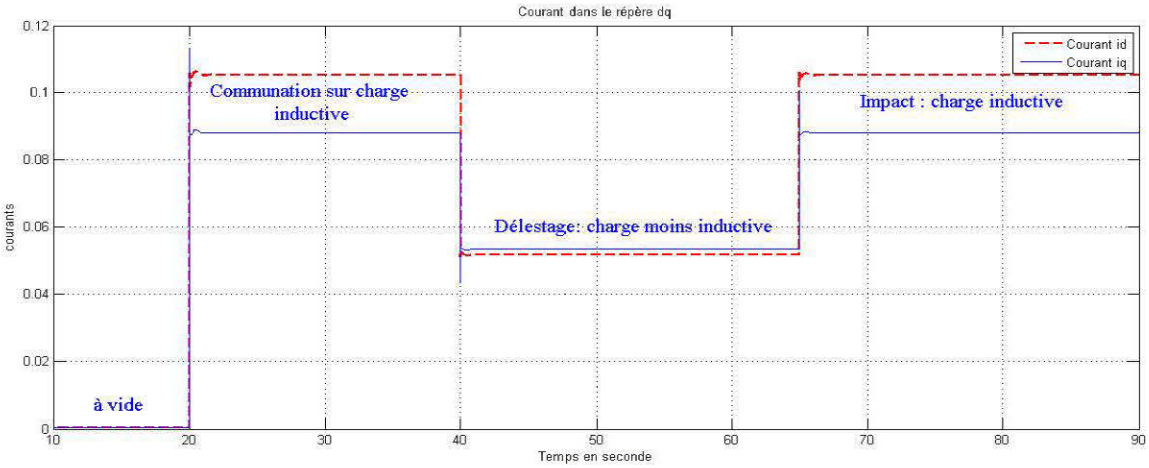
Les courants (Génératrice : Partie électrique et excitatrice)



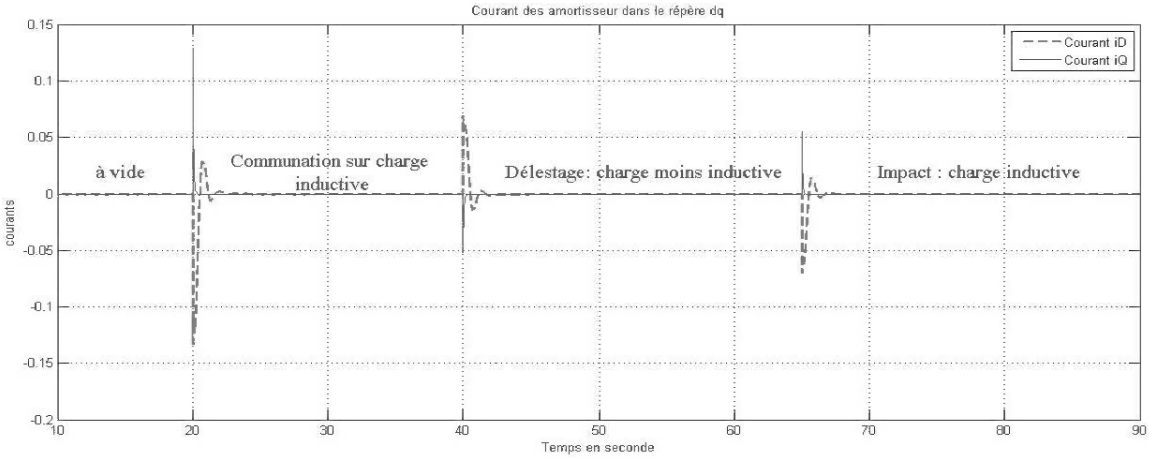
a) Courant dans le repère abc



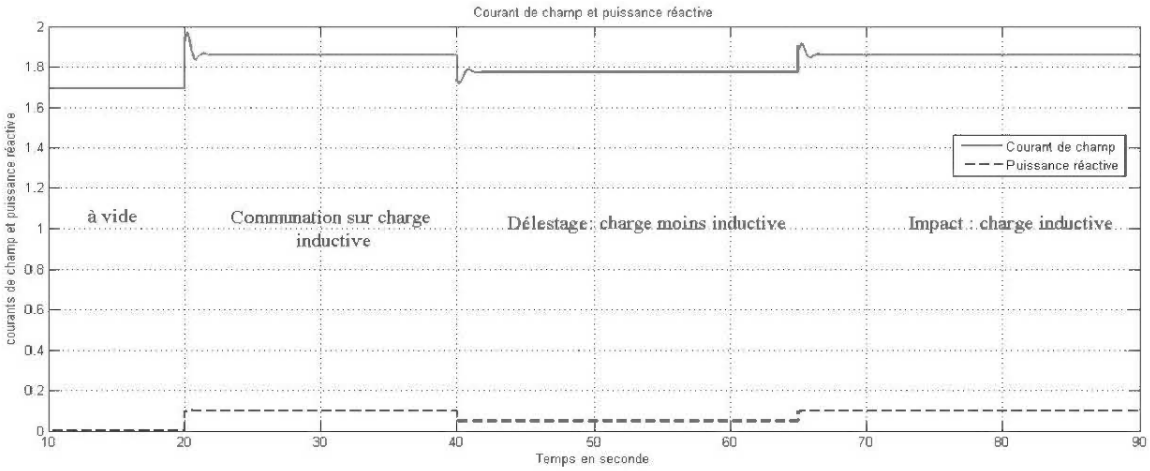
b) I_{abc} Zoom 1 **c) I_{abc} Zoom 2** **d) I_{abc} Zoom 3**



e) Courant i_d, i_q



f) Courant des amortisseurs I_D, I_Q



g) Courant de champ et puissance réactive

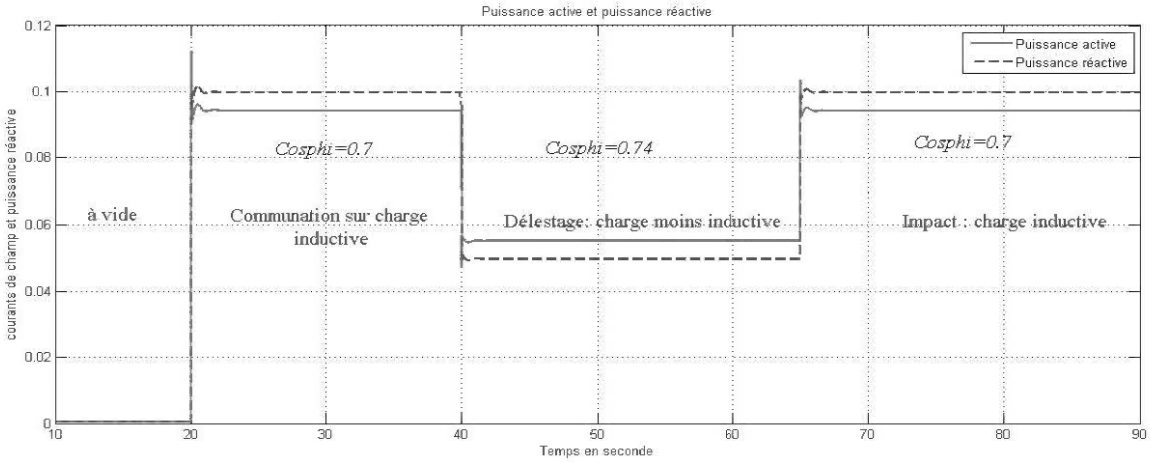
Figure 5-9 : Les courants

Pendant le fonctionnement à vide, les courants d'armature de la génératrice sont nuls (Figure 5-9 a, b, e). Le courant de champ à vide est celui de magnétisation (Figure 5-9 g : environ 1.7 p.u). On peut en effet constater sur la même figure qu'aucune puissance active n'est appelée par la charge. La commutation sur la charge inductive provoque une augmentation des courants Iabc de 14 % (Figure 5-9 a et b). La période transitoire dure environ 1.5s (Figure 5-9 b) et le nouveau régime permanent est atteint. Le courant dans l'axe q est plus sensible aux variations (Figure 5-9 e). Le sens de variation du courant de champ est le même que la puissance réactive (Figure 5-9 g). Le délestage se fait sur une

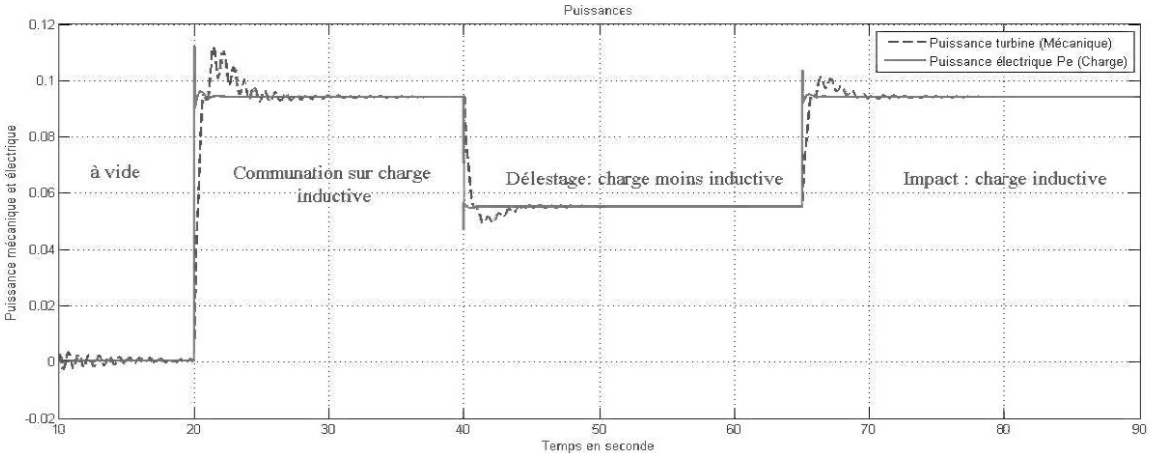
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

charge moins inductive, ce qui est justifié par l'augmentation de puissance réactive (Figure 5-9 g) et du facteur de puissance (Tableau 5-6). De ce fait, le courant de champ diminue (Figure 5-9 g). Les courants d'amortisseur subissent des changements pendant les transitoires et reviennent à la valeur nulle pendant le régime permanent (Figure 5-9 f). Le délestage s'est effectué à 6 %. Il en est de même pour l'impact de charge (Figure 5-9 a, e). Le comportement des courants d'armature est tel qu'indiqué le document [39].

Les puissances (Génératrice et hydraulique: Turbine et génératrice)

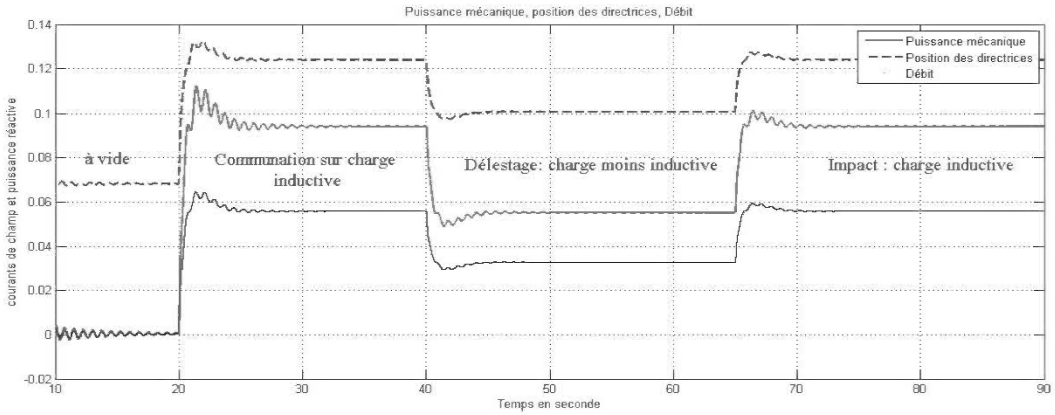


a) Puissance active et réactive

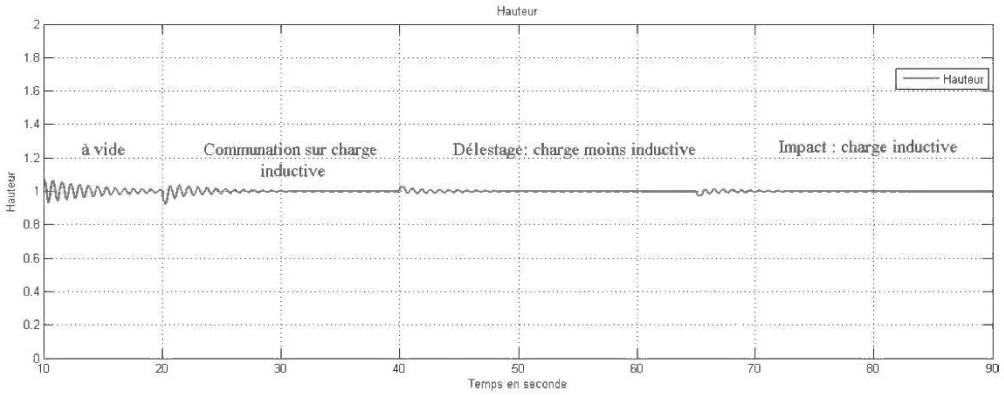


b) Puissance active et mécanique

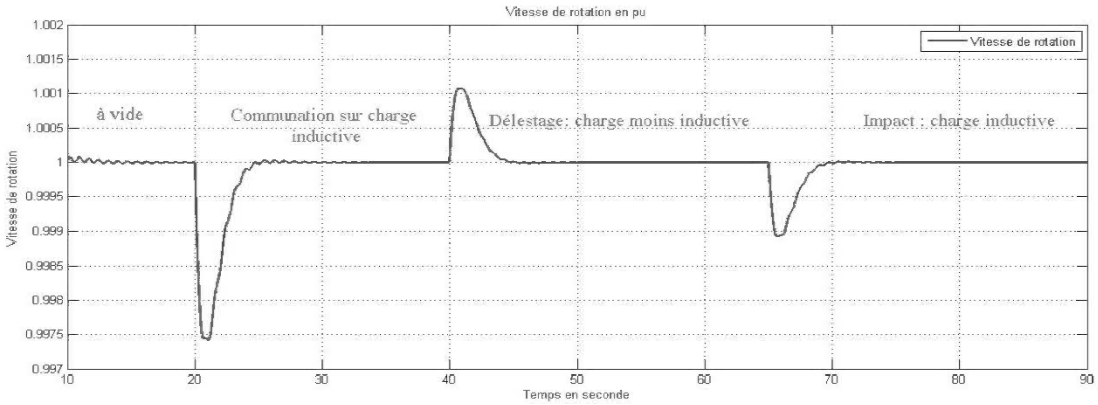
Débit, hauteur, position des directrices et vitesse de rotation (Circuit hydraulique)



c) Débit, puissance mécanique, position des directrices



d) Hauteur



e) Vitesse de rotation

Figure 5-10 : Résultats du circuit hydraulique

La Figure 5-10 présente les puissances, les différentes composantes du circuit hydraulique. Avant le délestage, la charge est moins plus inductive (Figure 5-10-a). La puissance active est en dessous de la puissance active. Cela est dû au choix du facteur de puissance. De même, après l'impact de charge, elle devient moins inductive. Après la période transitoire, la puissance au niveau de la turbine suit la puissance active en sortie (Figure 5-10-b). Le débit, la puissance mécanique et la position des directrices évoluent dans le même sens (Figure 5-10-c). La hauteur varie autour de l'unité (Figure 5-10-d). Une augmentation de puissance active a tendance à réduire la vitesse (freiner la machine par une augmentation du couple). Le phénomène est inverse pour une diminution de puissance mécanique (Figure 5-10-e). Les résultats concordent avec les attentes.

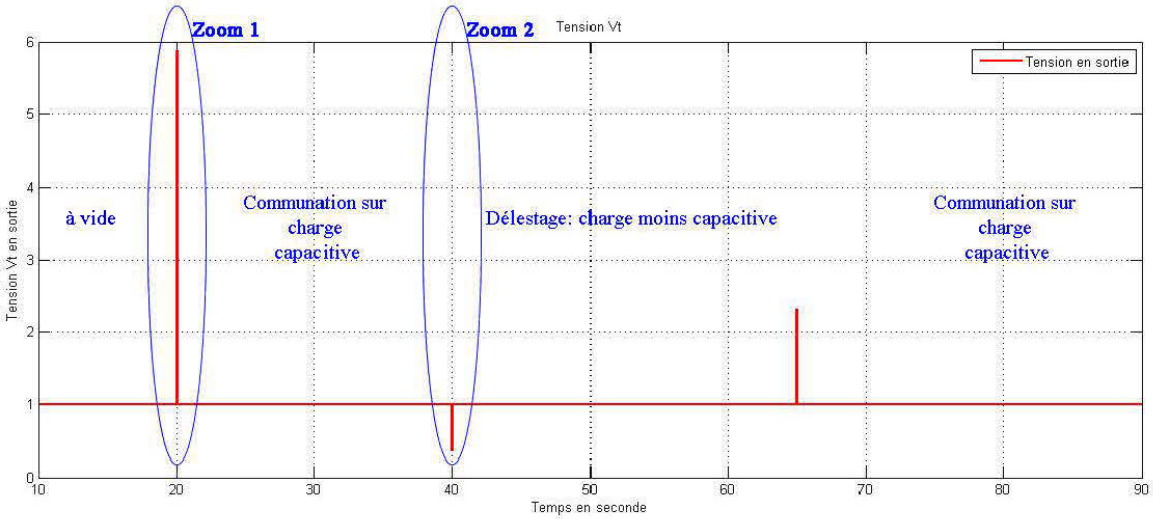
- ***Résultats pour une charge capacitive***

Les valeurs ayant de simulation d'une charge inductive sont présentées dans le Tableau 5-7.

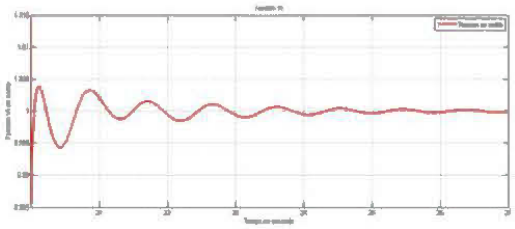
Tableau 5-7 : Données de sinnulation pour une charge capacitive

Sinnulation	Impédance		Cosφ	Puissance	
	Résistive p.u	Réactive p.u		Active	réactive
À vide	1000	1000		0.0005	0.0005
Charge inductive	5	-0.2	0.999	0.2	-0.008
Après délestage	7	-0.2	0.999	0.14	-0.004
Après enclenchement de charge	5	-0.2	0.999	0.2	-0.004

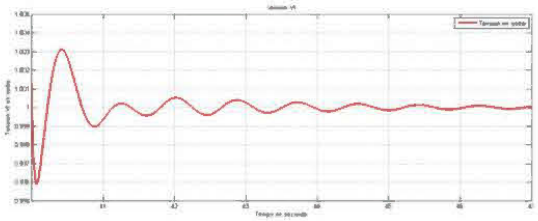
Les tensions



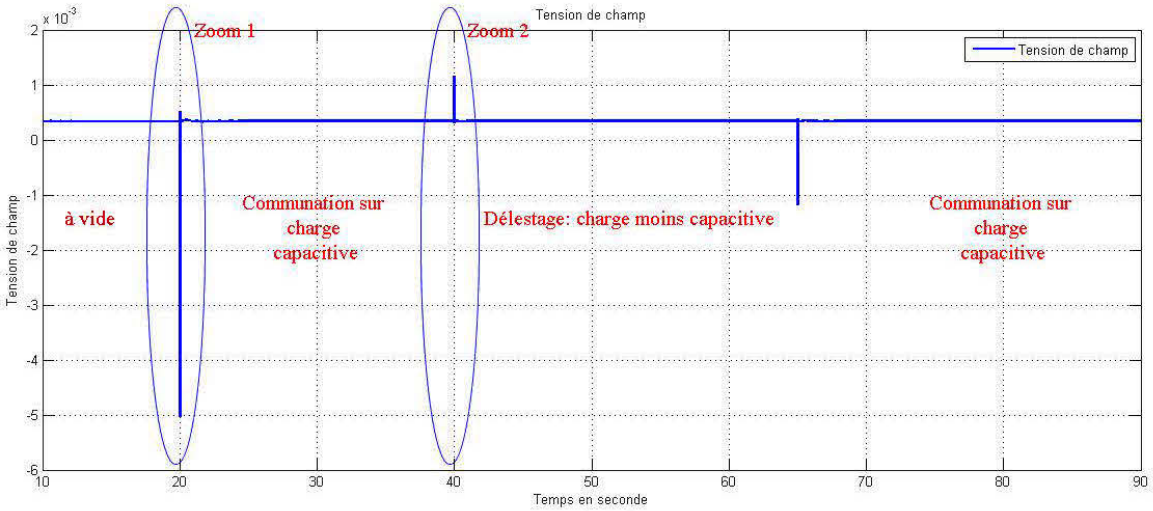
a) Tension d'armature v_t



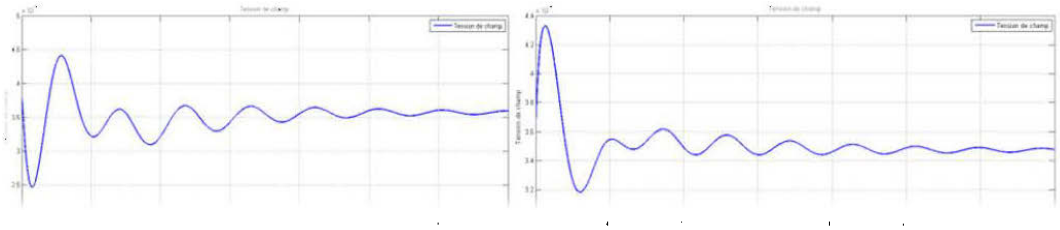
b) v_t Zoom1



c) v_t Zoom 2



c) Tension de champ v_f



e) v_f Zoom1 **f) v_f Zoom 2**

Figure 5-11 : Les tensions pour une charge capacitive

La tension d'armature subit une pique très importante pendant la commutation sur une charge capacitive (Figure 5-11-a). La réaction est directement perceptible au niveau de la tension du circuit d'excitation par une pique aussi prononcée (Figure 5-11-d). La période transitoire d'environ 7s est beaucoup plus importante (Figure 5-11-b,c,e,f).

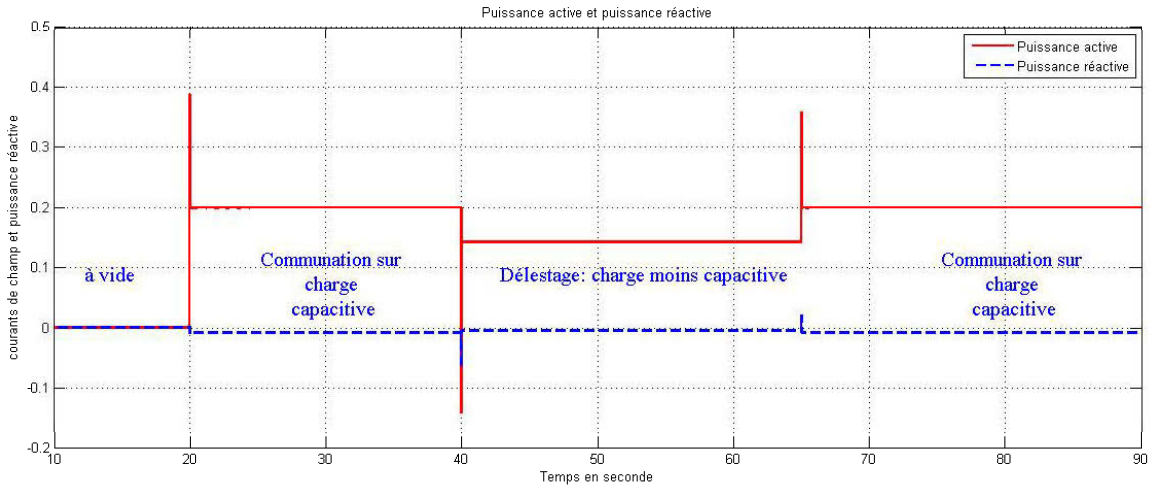


Figure 5-12 : Les puissances pour une charge capacitive

On peut aussi constater sur la Figure 5-12 des piques très prononcées. La charge capacitive fournie en effet de la puissance réactive au réseau. L'apport en puissance réactive a pour conséquence de booster la tension. Cet apport d'énergie réactive est constaté par sa valeur négative sur la Figure 5-12. C'est une raison pouvant expliquer

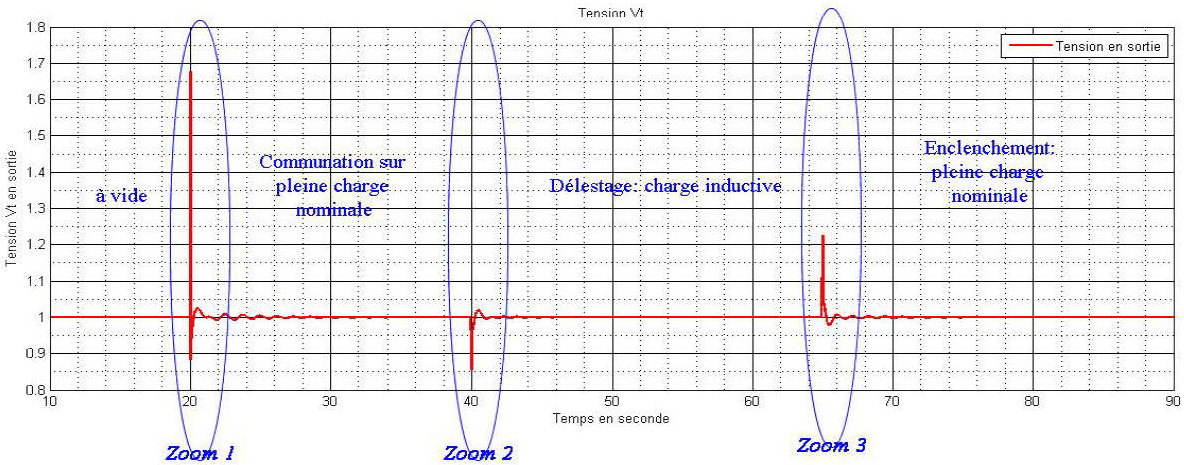
ces piques observées pendant la simulation d'une charge capacitive. Cette raison reste valable pour le délai de la période transitoire.

➢ ***Résultats pour une charge résistive.***

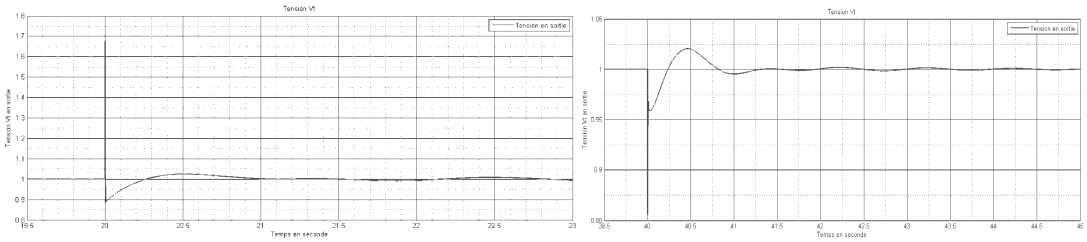
Les valeurs de simulation d'une charge inductive sont résumées dans le Tableau 5-8.

Tableau 5-8 : Données de simulation d'une charge résistive

Simulation	Impédance		Cosφ	Puissance	
	Résistive p.u	Réactive p.u		Active	réactive
À vide	1000	1000		0.0005	0.0005
Charge inductive	1	0.3287	0.95	1	
Après délestage	0.9	0.7937	0.75		
Après enclenchement de charge	1	0.3287	0.999		



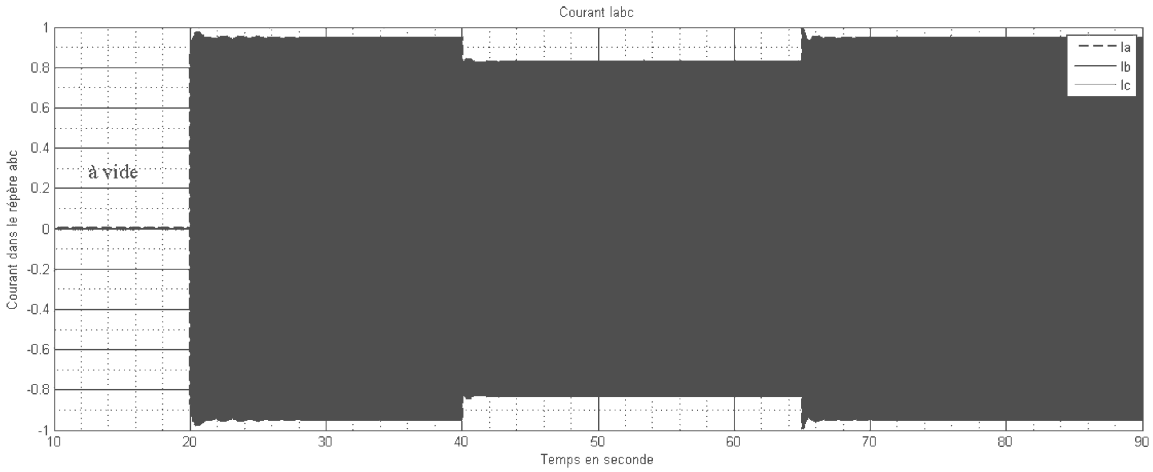
a) Tension Vt en p.u



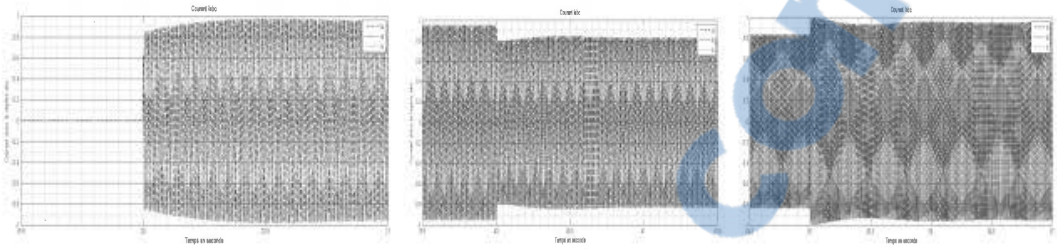
b) Zoom1 v_t. **c) Zoom2 v_t.**

Figure 5-13 : Les tensions

En principe, la commutation sur une pleine charge se fait en conservant un faible facteur de puissance. Cette astuce permet de maintenir le synchronisme de la génératrice tout au long du test. Dans la pratique, un important facteur de puissance a tendance à accélérer la rotation de la génératrice. On peut remarquer que cette tension revient toujours à l'unité après la période transitoire. La Figure 5-13-b représente le comportement à l'enclenchement de charge et la Figure 5-13-c le comportement au délestage.



a) Courants dans le repère abc



b) Zoom1 Iabc **c) Zoom2 Iabc** **d) Zoom3 Iabc**

Figure 5-14 : Les courants

La commutation sur la pleine charge provoque une augmentation des courants Iabc de 95% (Figure 5-14 -a). La transition dure environ 0.5s et le nouveau régime permanent est atteint. Le délestage s'est effectué à 11.5%. Il en est de même pour l'impact de charge (Figure 5-14 –b et c). Le comportement des courants d'armature est tel qu'indiqué le document [39].

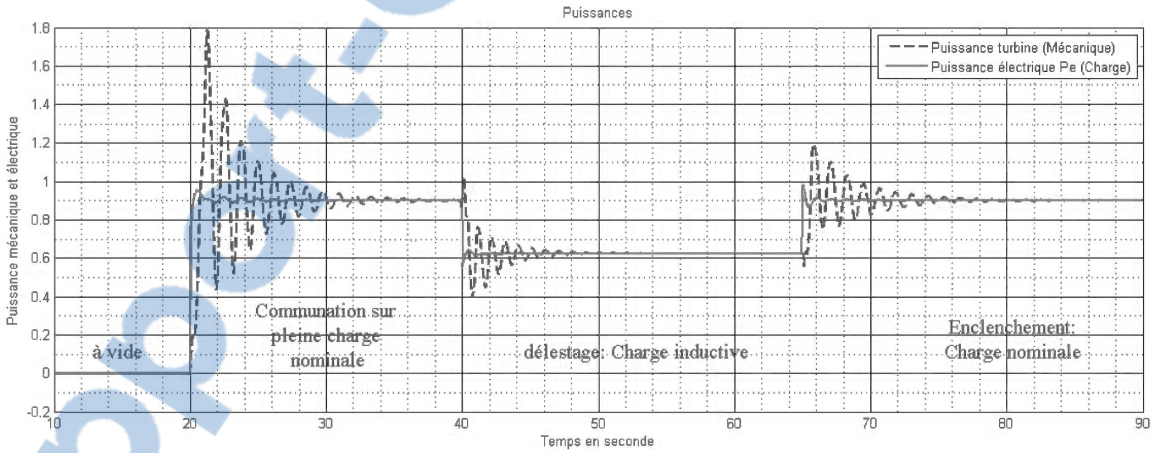


Figure 5-15 : Puissances mécanique et électrique

Rapport-Gratuit.com

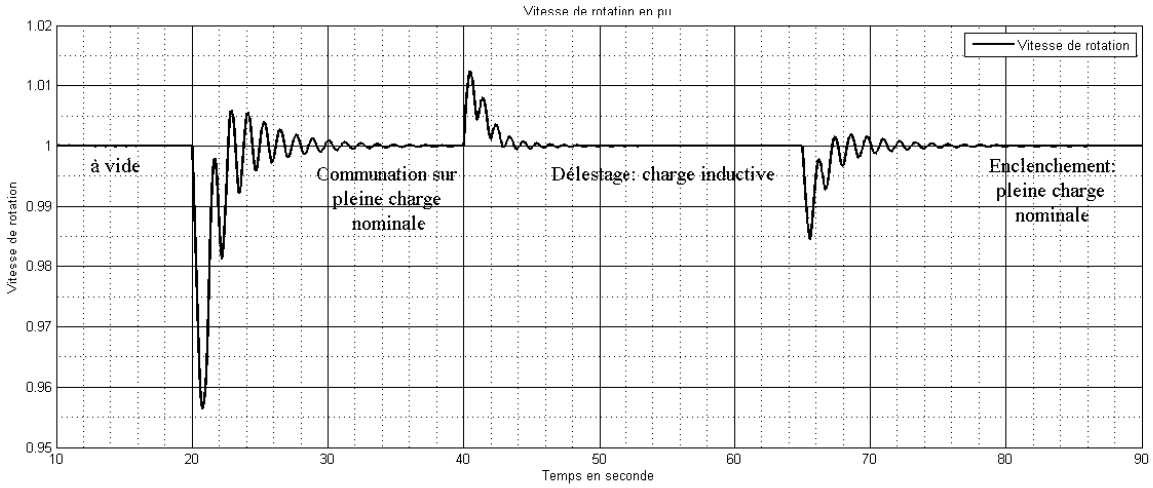


Figure 5-16 : Vitesse de rotation

La puissance active en sortie est en équilibre avec la puissance mécanique à l'entrée de la turbine durant tout régime permanent (Figure 5-15). Pendant les transitoires, la puissance mécanique subit des oscillations amorties avant de se stabiliser. Les oscillations sont d'autant plus importantes que la charge enclenchée ou délestée est grande. Ces oscillations sont particulièrement importantes dans ce cas. De même, l'importance de la charge ajoutée ou délestée influence énormément sur la période transitoire et les oscillations de la vitesse de rotation (Figure 5-16).

5.4 Conclusion

Les résultats montrent un fonctionnement attendu du modèle global. Tous les défis ont été réalisés et l'objectif final atteint. Le simulateur analogique en construction pourra facilement être introduit via la modification des valeurs dans les différents blocs et programmes présentés au Chapitre 4.

CHAPITRE 6

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire traite de la modélisation et de l'implémentation numérique du simulateur analogique de la société Hydro-Québec de Rouyn-Noranda en Abitibi Témiscaminque. Pour y parvenir, le travail a été réparti en cinq grandes étapes dont :

(1) une introduction générale qui justifie l'importance de ce thème sur le plan scientifique, socio-économique et éducatif. (2) Une revue de la littérature orientée vers les travaux effectués sur le simulateur analogique, afin de présenter ce dernier dans son fonctionnement, ainsi que ses similitudes avec les centrales réelles. (3) Une revue de littérature orientée vers les modèles numériques des centrales hydrauliques ainsi que les paramètres de modélisation. (4) La modélisation des différents blocs du simulateur conformément aux objectifs scientifiques et éducatifs recherchés. Enfin en (5), la mise en commun des différents blocs et le test du modèle numérique global.

Les données sont des valeurs réelles des centrales et des valeurs typiques présentes dans la littérature. Le simulateur analogique étant encore en construction.

Les défis relevés dans ce travail sont multiples. Ce sont :

- Le développement d'un modèle de conduite forcée basée sur le modèle d'état;
- La mise sur pied d'une représentation de turbine basée sur le modèle d'état de la conduite forcée
- Le développement d'un modèle d'état de l'excitatrice, implémentable dans MATLAB/Simulink
- Le développement d'un modèle d'état du régulateur de vitesse à partir du modèle idéal de la turbine, dans Matlab/Simulink

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- La mise sur pied d'un modèle numérique dynamique de la génératrice synchrone, prenant en compte la saturation. Les paramètres de saturations sont obtenus à partir des données de la caractéristique à vide réelle de la génératrice.
- La mise au point d'un modèle complet dans MATLAB/Simulink d'une centrale hydroélectrique. Ce modèle essentiellement basé sur les modèles d'état des différents blocs sera utile sur le plan de l'enseignement et de la formation, et aussi sur le plan scientifique sur plusieurs aspects, dont la détermination des paramètres, l'optimisation du simulateur, etc..

Au cours de la réalisation de ce thème, un article éducatif intitulé « **Development of an analog and didactical simulator for hydroelectric power plants**» a été présenté à Canadian Engineering Education Association (CEEA13). Un autre est en cours de préparation. Sur le plan scientifique, deux articles sont aussi en préparation, portant sur le circuit hydraulique et le modèle global.

Nous pensons avoir fourni au travers de ce document un maximum de données et d'informations tant sur le plan scientifique qu'éducatif, dont l'exploitation méthodique et judicieuse contribuera certainement à des avancées dans ces deux aspects. Malgré tout, l'amélioration par l'optimisation des différents blocs, l'exploitation des résultats venant des centrales ainsi que l'utilisation du modèle de la turbine basé sur les caractéristiques du prototype sont les bienvenues.

REFERENCES

[1] S. Weissenberger, "Le Québec élève-modèle du Canada dans le dossier des émissions de gaz à effet de serre: concours de circonstances ou l'exemple à suivre?," *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement,* vol. 5, 2004.

[2] L. Astrade, "La gestion des barrages-réservoirs au Québec: exemples d'enjeux environnementaux," in *Annales de géographie*, 1998, pp. 590-609.

[3] I. Fortier, "*Les avantages et les coûts, pour le Québec, de ne pas renouveler les «contrats à partage de risque» entre hydro-Québec et les alumineries en 2014.*," Mémoire de maîtrise 2008, 56 pp.

[4] M.-U. Proulx, *Un juste prix pour l'énergie du Québec?*: Puq, 2011, 186 pp. {ISNB: 978-2-7605-3163-5}.

[5] C. C. Mitigation, "IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation," 2011.

[6] O. Lawanto, "The Use of Enhanced Guided Notes in an Electric Circuit Class: An Exploratory Study," *Education, IEEE Transactions on,* pp. 1-1, 2012.

[7] L. G. Richards, A. K. Hallock, and C. G. Schnittka, "Getting them early: Teaching engineering design in middle schools," *International Journal of Engineering Education,* vol. 23, pp. 874-883, 2007.

[8] D. Cloutier and J. Cloutier, "Conception d'une machine synchrone de faible puissance pour le simulateur d'un groupe turbine alternateur," *Projet de fin d'étude de baccalaureat en électromécanique, Module des sciences appliquées*, UQAT, 2009.

[9] M. S. Amalou and M. A. Bouakra, "Conception d'un alternateur miniature pour le simulateur," *Projet de fin d'étude de baccalaureat en électromécanique, Module des sciences appliquées*, UQAT, 2008.

[10] M. F. Anctil and M. Constantin Draghici, "Conception et réalisation d'un groupe turbine alternateur, Ordonnancement des données techniques," *Projet de fin*

d'étude de baccalaureat en électromécanique, Module des sciences appliquées, UQAT, 2007.

[11] M. A. A. Chakib and M. C.Tatuilescu, "Finalisation de la conception du circuit hydraulique d'un simulateur de groupe turbine alternateur," *Projet de fin d'étude de baccalaureat en électromécanique*, Module des sciences appliqués UQAT, Août 2007.

[12] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control* vol. 4: McGraw-hill New York, 1994.

[13] X. Ding, "Sliding mode/ h¥control of hydropower plants," Master of Science, *Mechanical and Nuclear Engineering, The Pennsylvania State University The Graduate School*, 2011.

[14] R. Oldenburger and J. Donelson, "Dynamic response of a hydroelectric plant," *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers,* vol. 81, pp. 403-418, 1962.

[15] L. Hovey, "Optimum adjustment of hydro governors on Manitoba hydro system," *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers,* vol. 81, pp. 581-586, 1962.

[16] J. Undrill and J. Woodward, "Nonlinear hydro governing model and improved calculation for determining temporary droop," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on,* pp. 443-453, 1967.

[17] R. Byerly, "Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* pp. 1904-1915, 1973.

[18] W. G. o. P. M. a. E. Supply, "Models for System Dynamic Performance Studies, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models For System Dynamic Studies," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. vol. 7, No. 1, , pp. 167-179, February 1992.

[19] G. Blommaert, "Étude du comportement dynamique des turbines francis: contrôle actif de leur stabilité de fonctionnement," *École polytechnique fédérale de lausanne*, 2000.

[20] C. Nicolet, "Hydroacoustic modelling and numerical simulation of unsteady operation of hydroelectric systems," Doctoral thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2007.

[21] E. De Jaeger, N. Janssens, B. Malfliet, and F. Van De Meulebroeke, "Hydro turbine model for system dynamic studies," *Power Systems, IEEE Transactions on,* vol. 9, pp. 1709-1715, 1994.

[22] H. Fang, L. Chen, N. Dlakavu, and Z. Shen, "Basic modeling and simulation tool for analysis of hydraulic transients in hydroelectric power plants," *Energy Conversion, IEEE Transactions on,* vol. 23, pp. 834-841, 2008.

[23] H. Gao and C. Wang, "Effect of Detailed Hydro Turbine Models on Power System Analysis," in *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES*, 2006, pp. 1577-1581.

[24] C. Nicolet, P. Allenbach, J. J. Simond, and F. Avellan, "Modeling and numerical simulation of a complete hydroelectric production site," in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, 2007, pp. 1044-1048.

[25] O. Souza Jr, N. Barbieri, and A. Santos, "Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model," *Power Systems, IEEE Transactions on,* vol. 14, pp. 1269-1272, 1999.

[26] C. Vournas and G. Papaioannou, "Modelling and stability of a hydro plant with two surge tanks," *Energy Conversion, IEEE Transactions on,* vol. 10, pp. 368-375, 1995.

[27] M. R. G. Zoby and J. I. Yanagihara, "Analysis of the primary control system of a hydropower plant in isolated model," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,* vol. 31, pp. 5-11, 2009.

[28] C. Nicolet, A. Sapin, J. Simond, J. Prenat, and F. Avellan, "A new tool for the simulation of dynamic behaviour of hydroelectric power plants," 2001.

[29] D. Qian, J. Yi, and X. Liu, "Design of reduced order sliding mode governor for hydro-turbines," in *American Control Conference (ACC), 2011*, 2011, pp. 5073-5078.

[30] J. Aguero, P. Arnera, M. Barbieri, M. Beroqui, R. E. B. Lastra, J. Mastronardi, and R. Molina, "Hydraulic transients in hydropower plant impact on power system dynamic stability," in *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-6.

[31] E. B. Mouni, "Contribution à l'amélioration des performances des génératrices synchrones: nouvelle structure d'excitation basée sur une machine à aimants et combinée à des lois de commande avancées," *These de Doctorat, université de Poitiers, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers,* 2008.

[32] J. Lesenne, F. Notelet, and G. Seguier, "Introduction `a l'électrotechnique approfondie," Lavoisier TEC&DOC, 1980.

[33] R.Wamkeue, F.Baetscher, and I.Kamwa, "Hybrid State Model Based Time-Domain Identification of Synchronous Machine Parameters from Saturated Load Rejection Test Records," *IEEE Trans. on Eng Conv,* vol. 23, no 1, pp. pp 68-77, Mar 2008(IEEE PES 2009's best paper award).

[34] R.Wamkeue, C.Jolette, and I.Kamwa, "Advanced model for analysis and on-line assessment of a synchronous generator under line-switching and load-rejection tests," *IEEE Trans. Eng Conv,* vol. 25 No 3, 2010.

[35] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power system control and stability*: John Wiley & Sons, 2008.

[36] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power system analysis* vol. 621: McGraw-Hill New York, 1994.

[37] P. Anderson and A. Fouad, "Power System Control and Stability," 1994.

[38] P. M. Anderson and A. A. Fouad, "Power system stability and control," *New York, Board,* 1993.

[39] C.Jolette, "Développement des modèles d'essais et application à l'identification des machines synchrones et asynchrones triphasés " *Maîtrise en ingénierie, Université du Québec À Chicoutimi*, 2007.

[40] T. A. T. Theubou, "Modélisation et simulation d'un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale," *Maîtrise en ingénierie*, UQAT, AOÛT 2012.

[41] D. Ramey and J. W. Skooglund, "Detailed hydrogovernor representation for system stability studies," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on,* pp. 106-112, 1970.

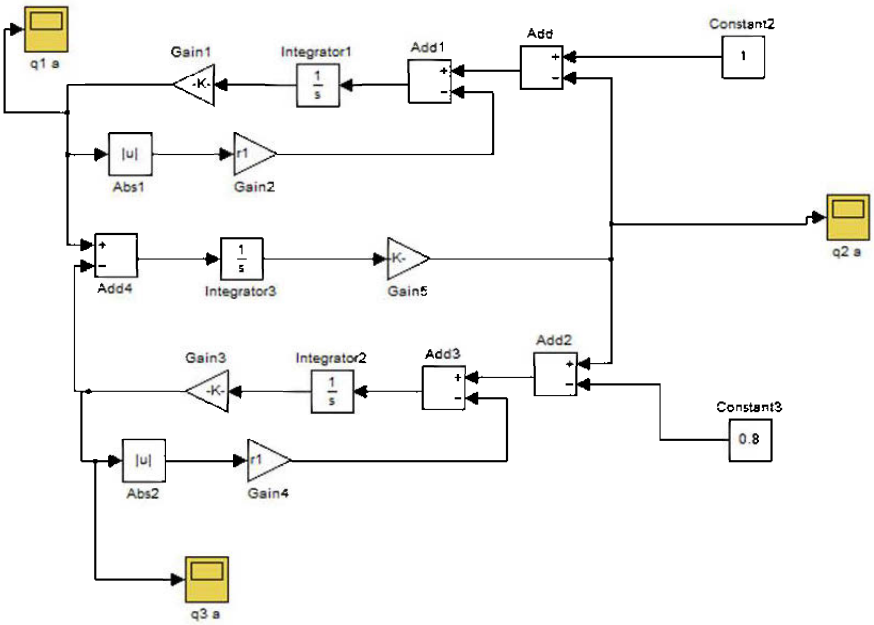
[42] C. Cyr, "Développement d'algorithmes de détection de défauts pour la maintenance prédictive de générateurs hydroélectriques," *Québec: Université Laval*, 2004.

[43] A. Ahmed-Chaouch, "Modélisation d'une turbine Hydraulique pour l'étude de la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique," ed: IREQ, 1995.

[44] F. Baetscher "Analyse et modélisation du délestage de la machine synchrone : application à l'estimation des paramètres électromécaniques," *Mémoire de maîtrise en électromécanique, , Université Laval, Québec*, 2004.

ANNEXES

Annexe 1



Modèle non linéaire de la conduite forcée incluant les effets de propagation d'onde et de la chambre d'équilibre.

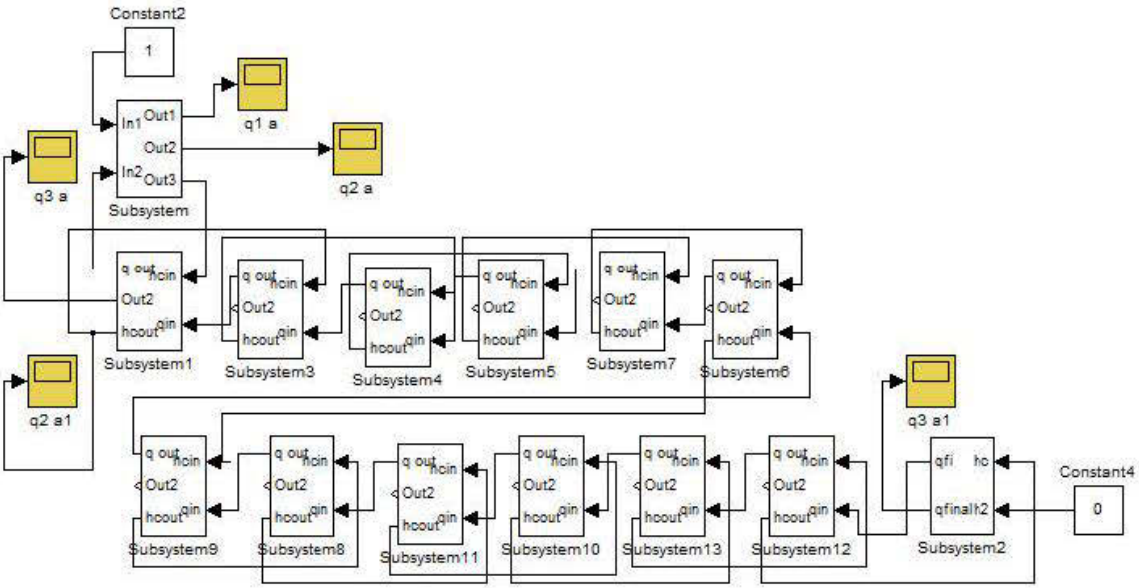
Annexe 2

Code Matlab de subdivision de la conduite forcée

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Sub
divusion du circuit hydraulique%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
clc;
%Déclaration des valeurs
L=600;                                                %Longueur
g=9.8;
n=13;                                                  % Nombre de division
Q0=1; H0=150;                                         % Débit  et hauteur de
la chute nominal
D1=0.5; Dx1=600/n; a1=1200;
 f1=0.018;                                            % Conduite forcée 1

 % Calcul des données équivalentes
S1=pi*(D1/2)^2;                                       % Calcul des surfaces
L1=(Q0*Dx1)/(g*H0*S1);                                %Calcul des inductances
équivalentes
R1=((f1*Dx1)*(Q0^2))/(2*g*D1*S1^2*H0);                %Calcul des résistances
équivalentes
C1=(H0*g*S1*Dx1)/(Q0*(a1^2));                         %Capacité équivalentes

%Elément de calcul des matrices du tuyeau 1
l1=L1/2; r1=R1/2;

l2=l1;%L2/2;
r2=r1;%R2/2;
C2=C1;
 l12=l1+l2;
r12=r1+r2;
% Utilisation des matrices
 % Nombre de vecteurs en fonction du nombre de divisions.
m=0;
ne=(n+1)*2;% Première partie de la conduite
me=(m+1)*2;%Deuxième partie de la conduite

%Détermination de la matrice A en considérant une seule conduite
 ln=L1/2; rn=R1/2;

l2=l1;%L2/2;
r2=r1;%R2/2;
cn=C1;

ls=l1+l2;
rs=r1+r2;
A2=zeros(ne,ne);
A2(1,2)=1; A2(2,1)=-1/(C1*l1); A2(2,2)=-r1/l1; A2(2,3)=1/(C1*l1);
```

Rapport-Gratuit.com

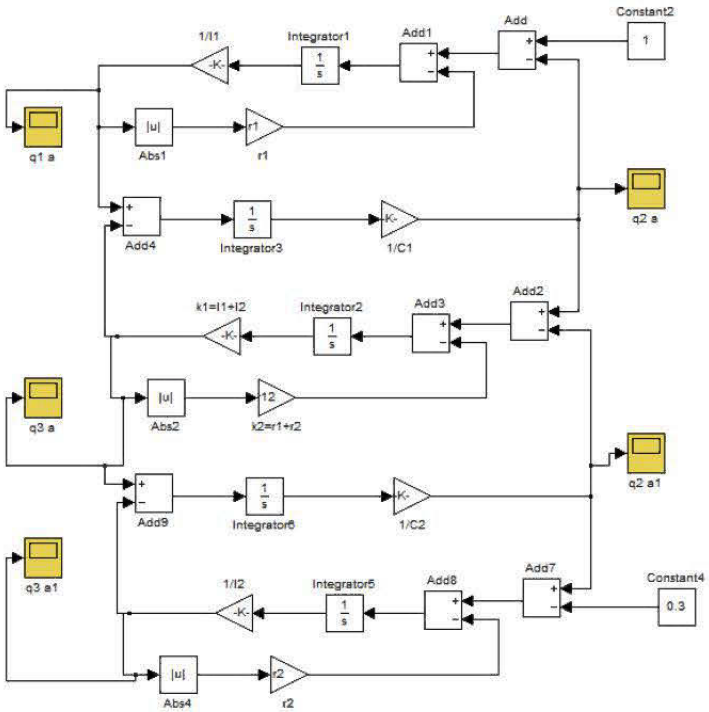
```
 A2(3,4)=1;

for i=4:2:ne-1
    A2(i,i-3)=1/(C1*ls); A2(i,i-1)=-2/(C1*ls); A2(i,i)=-(rs/ls);
A2(i,i+1)=1/(C1*ls); A2(i+1,i+2)=1;
end
A2(ne-1,ne)=1;
A2(ne,ne-3)=1/(C1*l1); A2(ne,ne-1)=-1/(C1*l1); A2(ne,ne)=-rn/ln;

% Matrice B
B=zeros(ne,2);
B(2,1)=1/ln; B(ne,2)=-1/ln;
%Matrice C
C=zeros(2,ne);  D=zeros(2,2);
C(1,2)=1; C(2,ne)=1;
```



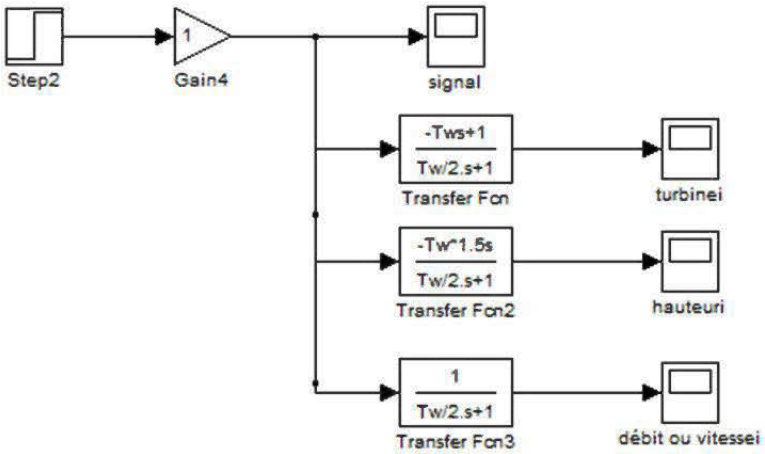
Modèle non linéaire de la conduite forcée incluant les effets de propagation d'onde et de la chambre d'équilibre pour une subdivision en 13 parties.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Annexe 3



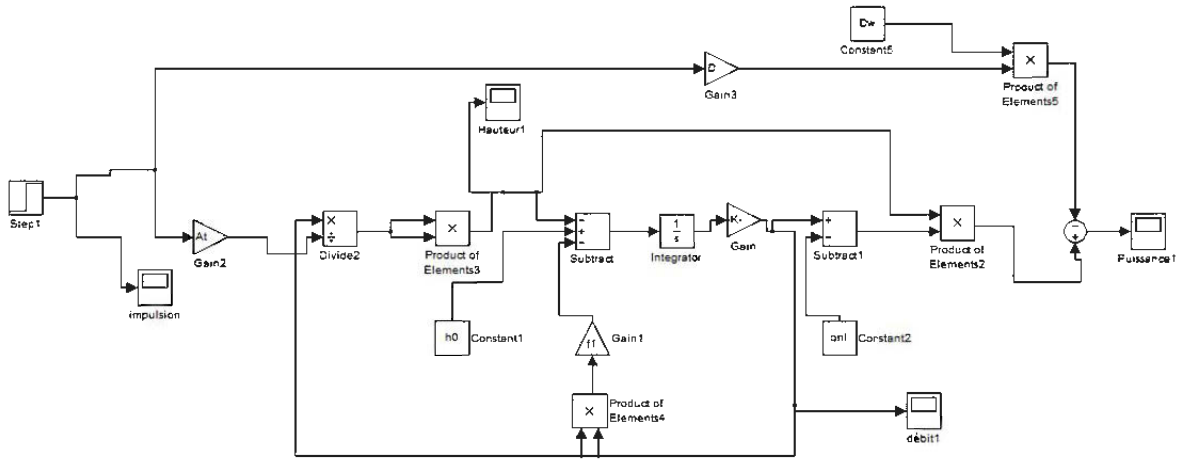
Modèle non linéaire de deux conduites forcées de diamètres différents, incluant les effets de propagation d'onde et de la chambre d'équilibre.



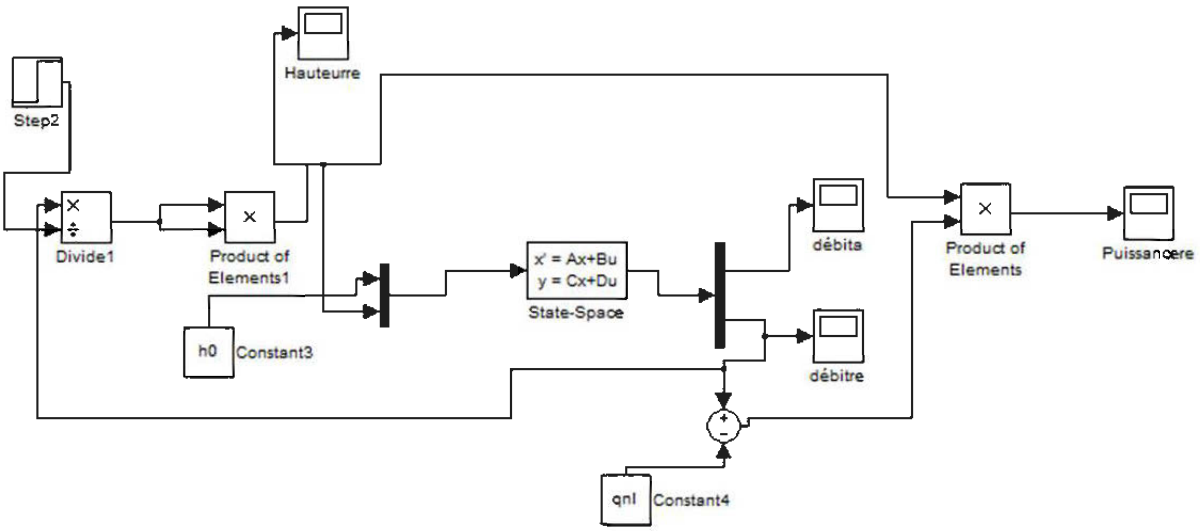
Modèle idéal de la turbine dans Simulink.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Annexe 4



Modèle non linéaire de la turbine dans Simulink



Modèle de la turbine pour le simulateur dans Simulink

Annexe 5

Code Matlab de calcul des conditions initiales

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% %%%%%Calcul des conditions initiales et de l'impédance de charge%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
.
clear all; clc;

%Introduction des valeurs

Pt=0.7; cosphi=0.6; iD=0; iQ=0; Vt=1;  wm=1; D=2; ra=0.0021; xd=0.93;
xq=0.69;
xmd=0.59; rf=0.0002;

phi= acos(cosphi);                    %Angle de déphasage


Qt= Pt*tan(phi);

It=(Pt/cos(phi));

 %Impédance de la charge

rc=Pt/It^2; xc=Qt/It^2;
%Conditions initiales

alphaVt=atan(((xq*It*cos(phi))-
(ra*It*sin(phi)))/((Vt)+(ra*It*cos(phi))+(xq*It*sin(phi))));
Vq=Vt*cos(alphaVt); Vd=-Vt*sin(alphaVt);
 vd=Vd*3^0.5; vq=Vq*3^0.5;
alphaIt=alphaVt+phi;
 Id=-It*sin(alphaIt); Iq=It*cos(alphaIt);
id=3^0.5*Id; iq=3^0.5*Iq;

E=Vq+(ra*Iq)-(xd*Id); ichamp=(3^0.5*E)/xmd;


vf=rf*ichamp;                                      %Tension de champ

X0=[id iq ichamp 0 0];                             %Conditions initiales


%Tension de champ à vide

vfv=(1/xmd)*rf;
```

Annexe 6

$$x''_d = \frac{\psi_d}{i_d} = x_a + \frac{1}{\frac{1}{x_{md}} + \frac{1}{x_{kf1} + \frac{x_f x_D}{x_f + x_D}}}$$

$$x''_q = \frac{\psi_q}{i_q} = x_a + \frac{1}{\frac{1}{x_{mq}} + \frac{1}{x_Q}}$$

En l'absence des amortisseurs dans les deux axes;

$$x'_d = x_a + \frac{1}{\frac{1}{x_{md}} + \frac{1}{x_f}} \text{ et } x'_q = x_a + \frac{1}{\frac{1}{x_{mq}}} = x_a + x_{mq} = x_q$$

$$T''_d = \frac{x_{ed}}{\omega_n r_D} = \frac{1}{\omega_n r_D}\left(x_D + \frac{x_f.\left(x_{kf1} + \frac{x_a x_{md}}{x_a + x_{md}} \right)}{x_{kf1} + x_f + \frac{x_a x_{md}}{x_a + x_{md}}} \right)$$

$$T'_q = \frac{x_{eq}}{\omega_n r_Q} = \frac{1}{\omega_n r_Q}\left(x_Q + \frac{x_a x_{mq}}{x_a + x_{mq}} \right)$$

$$T'_d = \frac{x_{ed}}{\omega_n r_f} = \frac{1}{\omega_n r_f}\left(x_f + x_{kf1} + \frac{x_a x_{md}}{x_a + x_{md}} \right)$$

$$T''_{d0} = \frac{x_{ed}}{\omega_n r_D} = \frac{1}{\omega_n r_D}\left(x_D + \frac{x_f\left(x_{kf1} + x_{md} \right)}{x_f + x_{kf1} + x_{md}} \right) \quad T''_{q0} = \frac{x_{eq}}{\omega_n r_Q} = \frac{1}{\omega_n r_Q}\left(x_Q + x_{mq} \right)$$

$$T'_{d0} = \frac{x_{ed}}{\omega_n r_f} = \frac{1}{\omega_n r_f}\left(x_f + x_{kf} + x_{md} \right)$$

Constante de temps sub-transitoires longitudinale et transversale de court-circuit T''_d *et* T''_q

Constante de temps longitudinale et transversale de court-circuit T_d' et T_q'

Constante de temps sub-transitoires longitudinale et transversale à circuit ouvert T''_{d0} T''_{q0}

Code Matlab de détermination des paramètres de la génératrice.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Détermination des paramètres de la machine%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Exemple de la machine du document de Fouad ander 258MVA (annexe 10)
clc; clear all;

% Introduction des données
% p désigne

xpd2=0.245;             % réactance sub transitoire de l'axe d
xpd=0.302;              % réactance transitoire de l'axe d
xd=0.930;               % réactance de l'axe d
xpq2=0.270;             % réactance sub transitoire de l'axe q
xq=0.690;               % réactance de l'axe q
ra=0.0021;              % résistance des enroulements statoriques
xa=0.340;               % réactance des enroulements statoriques
Tpd2=0.020;             %Constante de temps sub transitoire de l'axe d
Tpd=3.3;                %Constante de temps transitoire de l'axe d
Tpd0=8;                 %Constante de temps de l'axe d
Tpq2= 0.020;            %Constante de temps sub transitoire de l'axe q
Tpq20=0.06;
rf=0.181;               %Résistance des enroulements rotorique
Ta=0.2;

% Détermination des grandeurs
xmd=xd-xa; xmq=xq-xa; wref=2*pi*60;
xf=xmd*((xpd-xa)/(xd-xpd));
xff=xf+xmd;
xD=(xmd*xf*(xpd2-xa))/((xmd*xf)-xff*(xpd2-xa));
xDD=xD+xmd;
xQ=xmq*((xpq2-xa)/(xq-xpq2));
xQQ=xmq+xQ;
rf2=xff/(Tpd0*wref);
rD=(xpd2*((xDD*xff)-xmd^2))/(xff*xpd*Tpd2*wref);
Tpq2=(xpq2/xq)*Tpq20;
rQ=(xpq2*xQQ)/(Tpq2*xq*wref);

%Récapitulatif des grandeurs

S=[xf xD xQ rf2 rD rQ];
```

Annexe 7

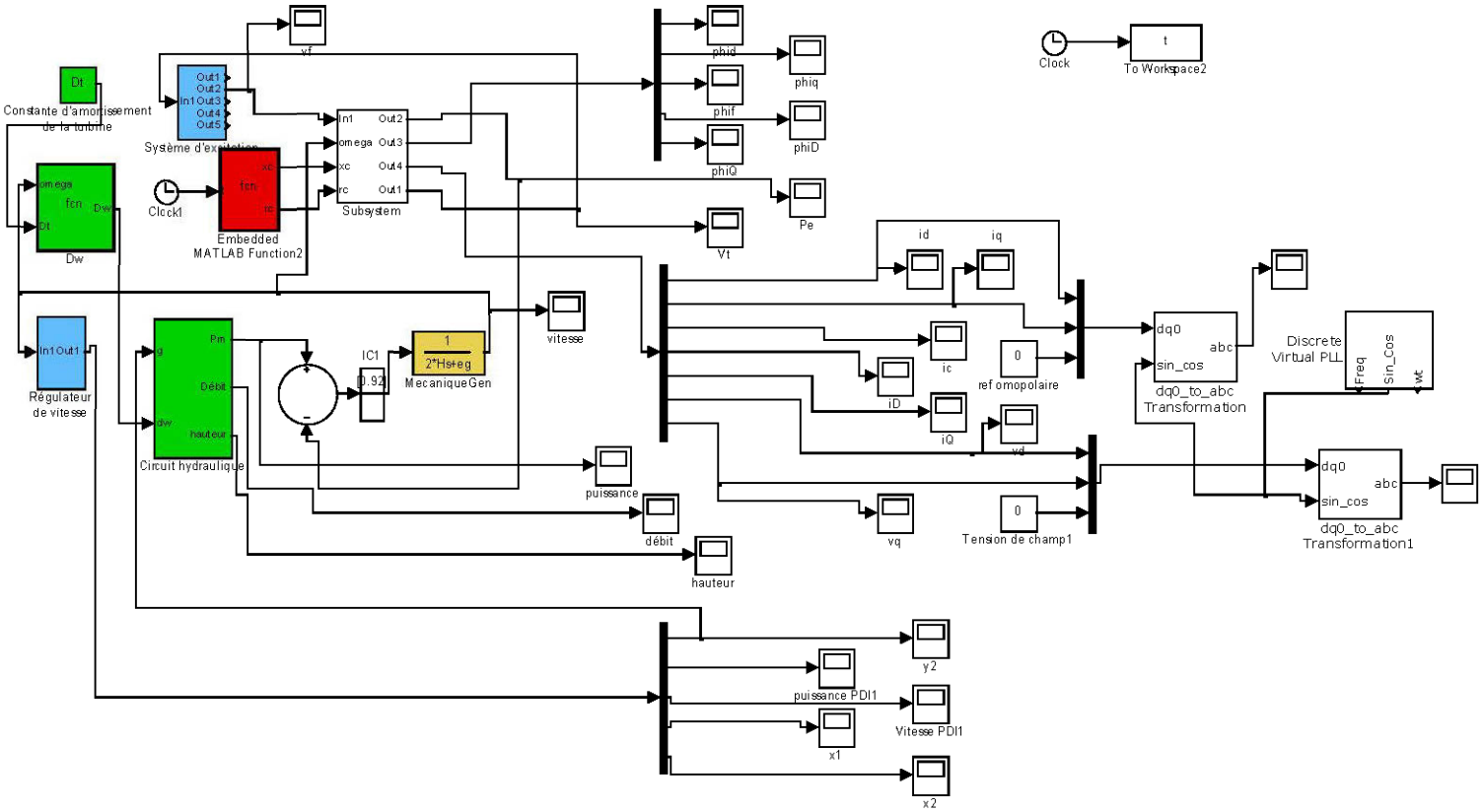
Document Fouad Anderson : Paramètres de la génératrice			
Moteur Paramètres mécaniques	nombre		
	Puissance S	231.60MVA	
	Courant nominal		
	Puissance active		
	Puissance réactive		
	Inertie J (Turbine+gen)	786.00MW.s	
	Coefficient de perte D	2	
	Nombre de pôles P	64	
	Fréquence f	60hz	
	Coefficient de perte B(Mécanique)		
	Résistance du rotor (à 25°C)		
	Résistance du stator (à 25°C)		
	Vitesse nominale		
	Facteur de puissance	0.95	
	Tension nominale	13800 Volt	
Paramètres électriques (p.u)		donné	Mesuré
	Rapport de court-circuit (pu)	1.175	
	x''_d	0.245	
	x'_d (pu)	0.302	
	x_d (pu)	0.930	
	x''_q (pu)	0.270	
	x_q (pu)	0.690	
	r_a (pu)	0.0021	
	x_a (pu)	0.340	
	T''_d	0.020s	
	T'_d	3.3	
	T''_{d0}	0.030	
	T'_{d0}	8	
	T''_q	0.20	
	T''_{q0}	0.06	
	r_f	0.181	
	T_a	0.2	
Valeur des			

paramètres calculés				
Excitatrice	**A Siemens**			
	Constante de temps du filtre d'entrée τ_R		*0*	
	Taux de réponse de l'excitatrice		*1*	
	Gain du régulateur KA		*17.8*	
	Constante de temps du régulateur τ_A		*0.06*	
	Constante de temps du régulateur 2 τ_{A2}		*000*	
	Tension maximale de sortie du régulateur $V_{R\max}$ (pu)		*1*	
	Tension minimale de sortie du régulateur $V_{R\min}$ (pu)		*-1*	
	Gain du Excitatrice Ke		*-0.08*	
	Constante de temps excitatrice τ_e		*0.405*	
	Gain du stabilisateur du régulateur K_F		*0.0648*	
	Constante de temps du stabilisateur du régulateur τ_F		*1*	

Valeur typiques pour une génératrice de centrale

Annexe 8

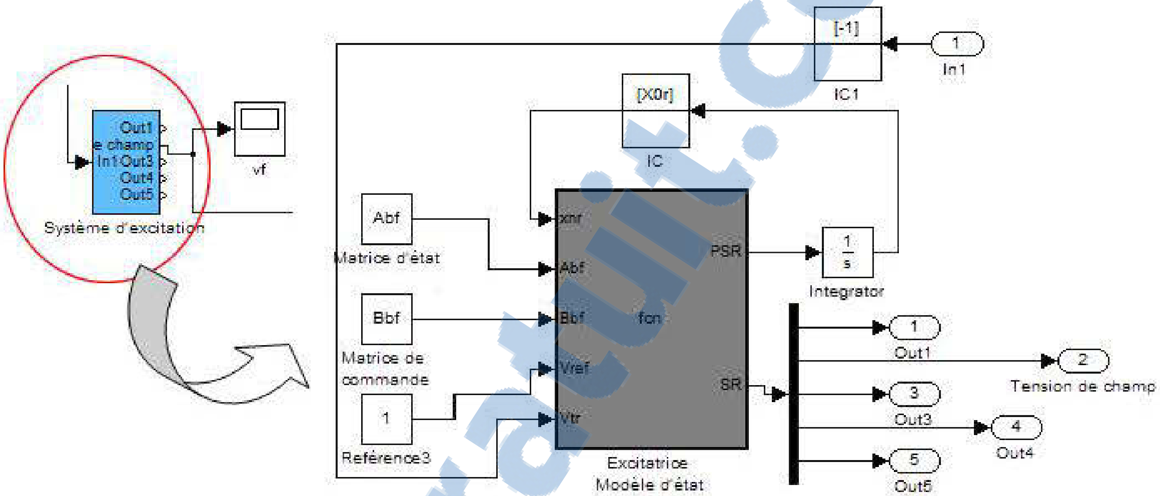
Présentation du système dans MATLAB/SIMULINK



Structure du système global dans simulink

Annexe 9

Système d'excitation.



Structure du système d'excitation dans simulink

Programme inclus dans la fonction fcn

```
function [PSR,SR]t = fcn(xnr,Abf,Bbf,Vref,Vtr)
%#eml

 Cbf=eye(5); Dbf=zeros(5,1);
xnr1=[xnr(1); xnr(2); Vtr; xnr(4); xnr(5)];
PSR=Abf*xnr1+Bbf*Vref;
SR=Cbf*xnr1+Dbf*Vref;
```

Programme de calcul des matrices du modèle

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Système d'excitation%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%clear all; clc;
KR = 1; KF = 10; KA =17.8; KE = -0.08; KG = 2948;
 % constante de temps
TR = 0.0001; TF = 0.1; TA = 0.0001; TE = 0.405; TG =7.87;
SE = 0;
% fonctions de transfert
s = tf('s');
GR = KR/(1+s*TR);
GF = s*KF/(1+s*TF);
GA = 1/(1+s*TA);
GE = 1/(KE+s*TE);
```

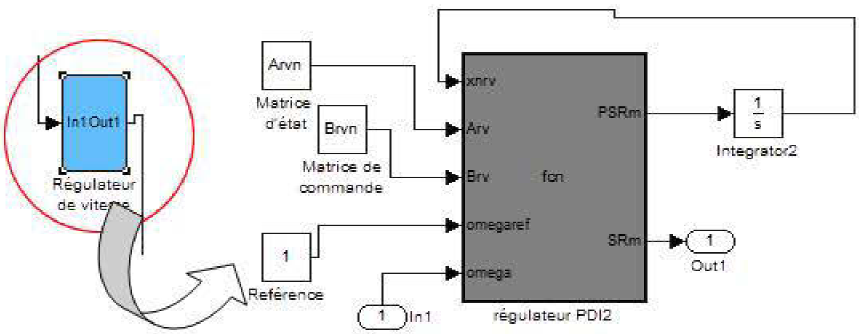
Rapport-Gratuit.com

```
GG = KG/(1+s*TG);
% Boucle interne
GAES = GA*GE/(1+GF*GA*GE);
% fonction de transfert en boucle ouverte
GBo = GAES*GG*GR;
GBf = GAES*GG*KA/(1+GAES*GG*GR*KA);
% Graphiques
% figure(1)
% step(GBf);
% grid on;
% tracé de la position des pôles
%figure(2)
%rlocus(GBo); grid on;

%Modèle Matrice du modèle d'état.

 KC=KF; TC=TF; fSE=SE;

  % Boucle fermée

Abf=[-1/TA           -(KA*KC)/(TA*TC)        0          KA/(TA*TC)    -
KA/TA
      1/TE             -(KE+fSE)/TE          0             0
0
      0                     KG/TG          -1/TG           0
0
      0                     KC/TC            0           -1/TC
0
      0                      0             KR/TR           0
-1/TR];
  Bbf=[KA/TA; 0; 0; 0; 0];

  Cbf=eye(5); Dbf=zeros(5,1);

% Pour Simulink
Taue ='TE; Tauc=TC; Taug=TG; Taua=TA; Ke=KE; Kr=KR; Ka=KA; Taur=TR;

X0r=[0;0;1;0;0];
```

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Annexe 10

Régulateur de vitesse



Structure du régulateur de vitesse dans simulink

Programme contenu dans la fonction fcn

```
function [PSRm,SRm] = fcn(xnrv,Arv,Brv,omegaref,omega)
%#eml

Crv=eye(5); Drv=zeros(5,1);
xnr1=[xnrv(1); xnrv(2) ; omega ; xnrv(4); xnrv(5)];
PSRm=Arv*xnr1+Brv*omegaref;
SRm=Crv*xnr1+Drv*omegaref;
```

Programme de calcul des matrices du modèle avec gain g

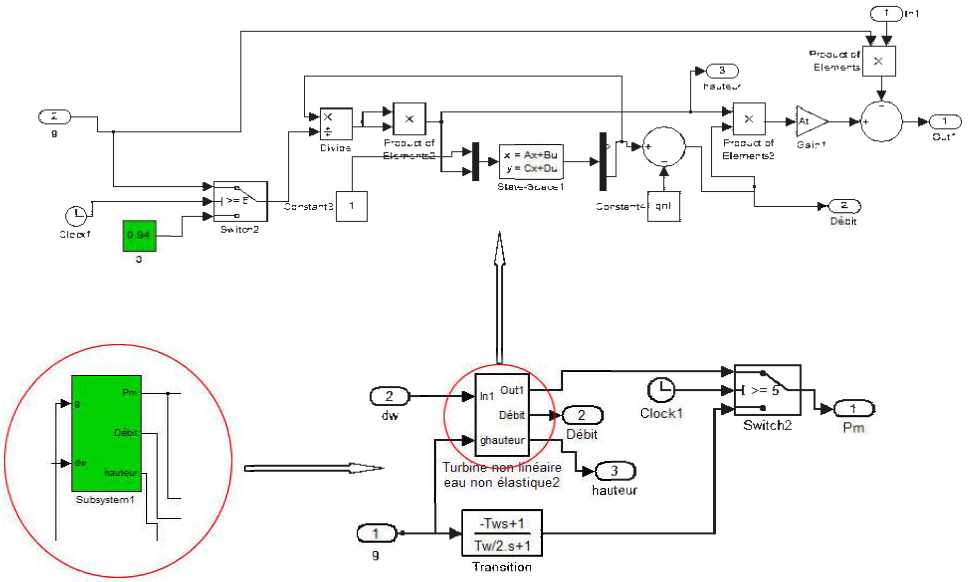
```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Régulation de vitesse%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Ty=0.5; H=4.8; Kp=H/(0.625*Tw); G=10;
Ki=Kp/(3.33*Tw);
Kd=((Kp*Tw)/3)+0.01;
Tn=0.05;
eg=0.000001;
%Nouvelle matrice du PDI amélioré
Arvn=[((-1/Ty)-(G/Ty))          0                         -
G*((Kp/Ty)+(Kd/(Tn*Ty)))         -G/(Tn*Ty)          G/Ty;
    ((2/Tw)+(2/Ty)+(2*G/Ty))    -2/Tw
2*G*((Kp/Ty)+(Kd/(Tn*Ty)))          2*G/(Tn*Ty)       -2*G/Ty;
    0                          1/(2*H)                             -
eg/(2*H)                    0             0;
    0                           0                                  -
Kd/Tn                   -1/Tn             0;
    0                           0                                   -Ki
0             0];
```

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

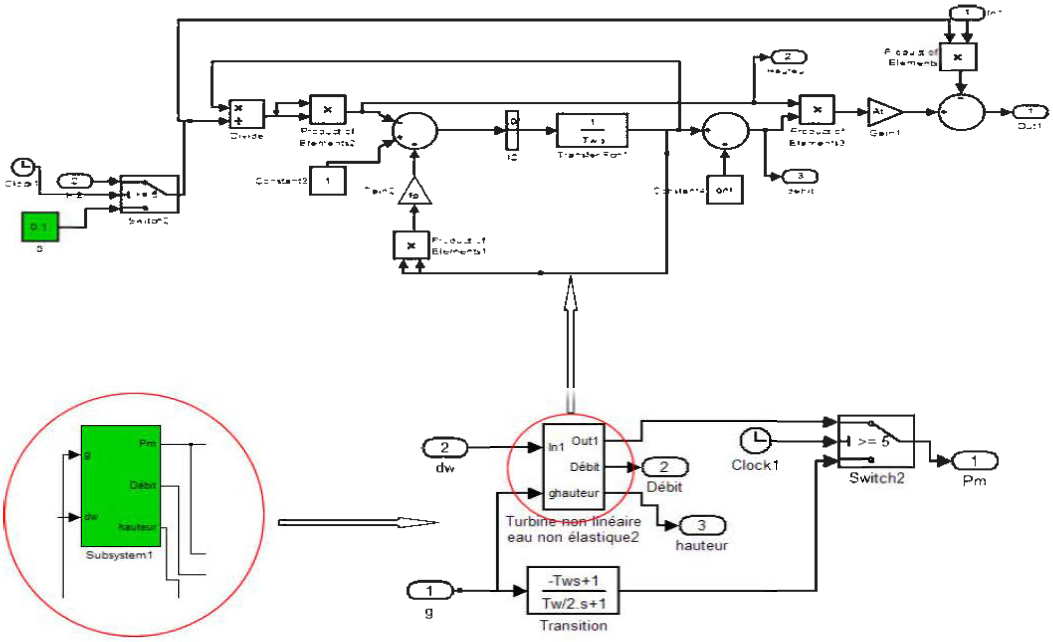
```
Brvn=[G*((Kp/Ty)+(Kd/(Tn*Ty)))          ;    -
2*G*((Kp/Ty)+(Kd/(Tn*Ty)))       ;  0       ; Kd/Tn  ;  Ki];

Crv=eye(5,5); Drv=zeros(5,1);
```

Annexe 11

Circuit hydraulique



Structure du circuit hydraulique avec modèle du simulateur de la turbine dans simulink



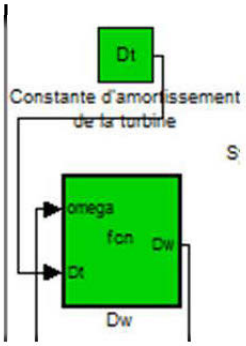
Structure du circuit hydraulique avec modèle simplifié de la turbine dans simulink

Programme de calcul des données du circuit hydraulique

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Circuit hydraulique%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Hauteur et débit de base (Valeurs nominales).
Hb=207.9;
Hr=Hb; Qb=216.720;
g=9.81;
Dt=0.5;                                 %Coéfficient d'amortissement de
la turbine
% Valeur des débits et hauteur
Qr=261.720;                             % Débit nominal
Qnl=4.3;                                % Débit à vide
Hn=Hr;                                  % Hauteur nominale
a=1243.966;                             %Vitesse de propagation des
ondes
 % Constante de conversion
Pg=231.61;
Pt=340;%90.94;
qr=0.94;%Qr/Qb;
qnl=0.068;%Qnl/Qb;
hr=Hr/Hb;

At=Pt/(Pg*hr*(qr-qnl));

%At=1/(qr-qnl);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Cas sans chambre d'équilibre
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

D=7.9;                       %Diamètre de la conduite
A=pi*(D/2)^2;                %Surface de la conduite
L=207.8968;                  % Longueur totale de la conduite

Tw=(L*Qb)/(A*g*Hb);
fp=0.01;

%######################################################################
%Exploitation du modèle d'état de la conduite
%######################################################################
% Calcul des données équivalentes
S1=pi*(D/2)^2;                                  % Calcul des surfaces
L1=(Qb*L)/(g*Hb*S1);                           %Calcul des inductances
équivalentes
R1=((fp*L)*(Qb^2))/(2*g*D*S1^2*Hb);           %Calcul des résistances
équivalentes
C1=(Hb*g*S1*L)/(Qb*(a^2));                    %Capacité équivalentes
n=1;

%Elément de calcul des matrices du tuyeau 1
l1=L1/2; r1=R1/2;
```

```
l2=l1;
r2=r1;
C2=C1;

l12=l1+l2;
r12=r1+r2;

% Utilisation des matrices

% Nombre de vecteurs en fonction du nombre de divisions.
m=0;
ne=(n+1)*2;% Première partie de la conduite
me=(m+1)*2;%Deuxième partie de la conduite

%Détermination de la matrice A en considérant une seule conduite

ln=L1/2; rn=R1/2;

l2=l1;
r2=r1;
cn=C1;

ls=l1+l2;
rs=r1+r2;
A2=zeros(ne,ne);
A2(1,2)=1; A2(2,1)=-1/(C1*l1); A2(2,2)=-r1/l1; A2(2,3)=1/(C1*l1);
 A2(3,4)=1;

for i=4:2:ne-1
    A2(i,i-3)=1/(C1*ls); A2(i,i-1)=-2/(C1*ls); A2(i,i)=-(rs/ls);
A2(i,i+1)=1/(C1*ls); A2(i+1,i+2)=1;
end
A2(ne-1,ne)=1;
A2(ne,ne-3)=1/(C1*l1); A2(ne,ne-1)=-1/(C1*l1); A2(ne,ne)=-rn/ln;

% Matrice B
B=zeros(ne,2);
B(2,1)=1/ln; B(ne,2)=-1/ln;
%Matrice C
C=zeros(2,ne);  D=zeros(2,2);
C(1,2)=1; C(2,ne)=1;
```

Coefficient d'amortissement.



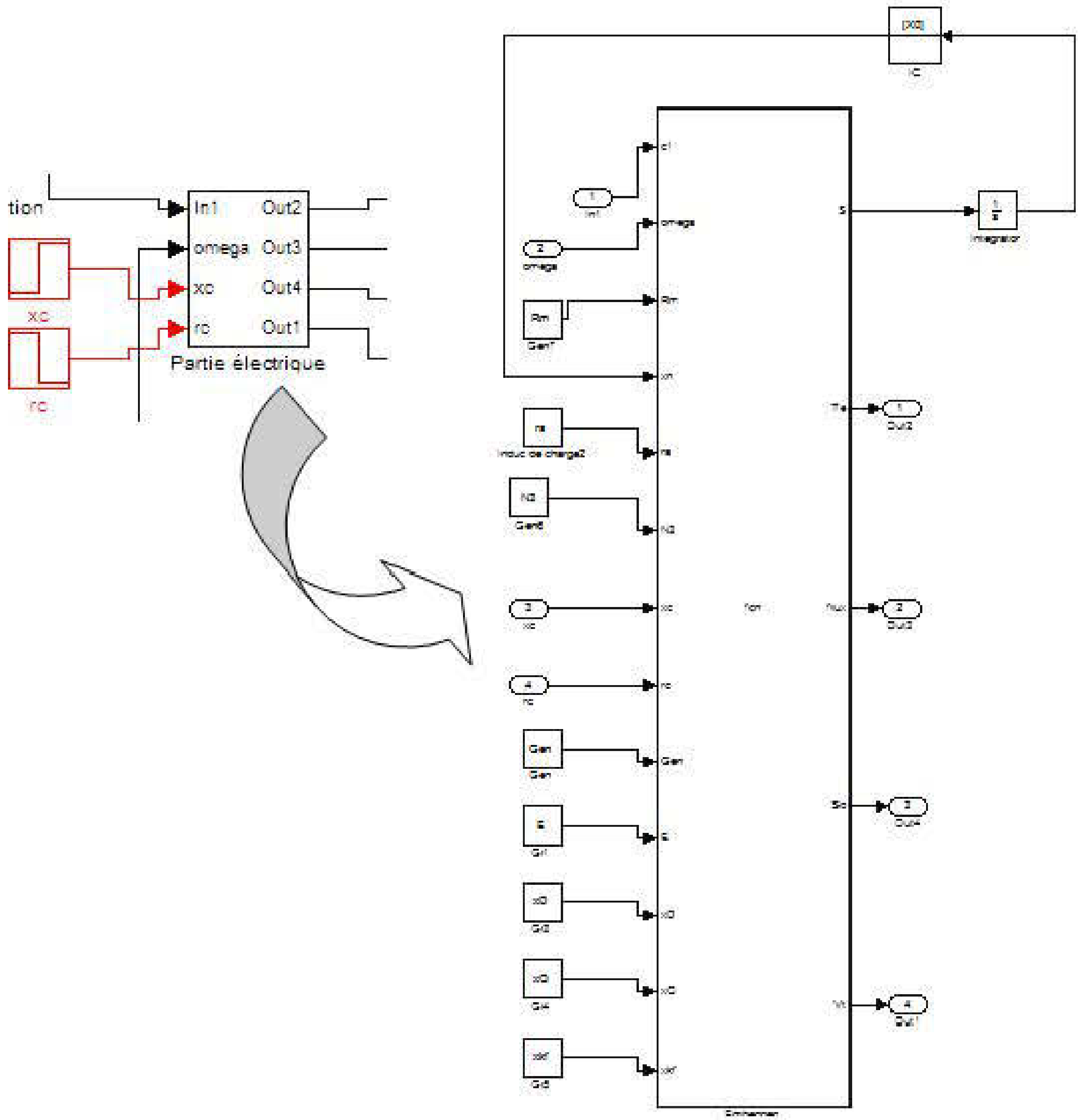
Structure permettant de prendre en compte le coefficient d'amortissement dans simulink

Programme dans la fonction fcn

```
function Dw = fcn(omega,Dt)
%#eml
 w=omega;
Dw=(1-w)*Dt;
```

Annexe 12

Génératrice synchrone



Structure de la génératrice synchrone dans simulink

Le programme de calcul des valeurs de la génératrice

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Détermination des matrices et des paramètres pour le fonctionnement%
%%%%%%%%%%%%%%%de la génératrice dans MATLAB/SIMULINK%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Paramètres du système

clc; clear all;
f = 60;
p = 2;                                  %Nombre de pôles
wref = 2*pi*f;
wmref = wref/p;                         %Fréquence, Nombre de pairs de
pôles, vitesse de synchronisme
nd = 1;                                 % nombre d'amortisseurs sur
l'axe d
nq = 1;                                 % nombre d'amortisseurs sur
l'axe q
wn=wref;                                %Vitesse de rotation nominale,
ou de reférence
rc=1;                                   %Résistance de la charge
xc=0.3287;                               %Inductance de la charge

wm=wn;

%%% Définition des paramètres d'une GENERATRICE SYNCHRONE en pu

ra = 0.0021;                            %Resistance d'armature d'axes d
et q
rf = 0.0002;                            %Resistance au rotor
rD = [0.0027 0];                        %Resistance des amortisseurs
sur l'axe d
rQ = [0.0129 0];                        %Resistance des amortisseurs
sur l'axe q
xD = [0.0633 0];                         %inductance des amortisseurs
ramenées sur l'axe d
xQ = [-0.0583 0];                        %inductance des amortisseurs
ramenées sur l'axe q
xkf = [-0.000 0];                       %

xmd = 0.590; xmq =0.35;              %inductance magnétisante ramenée
sur les axes d et q
xa = 0.340;                            %inductance des fuites
d'armature d'axes d et q
xf = -0.0357;                            %inductance rotorique

xfD=[xmd+xkf(1) xmd+xkf(1)+xkf(2)];

% Calcul des inductances
xDD=[xfD(1)+xD(1) xfD(2)+xD(2)];
xd = xmd + xa;
xq = xmq + xa;
xQQ = xmq + xQ;

%Calcul de xff;
xff=xf + xmd;
for i=1:nd
xff = xff+ xkf(i);
```

```
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%Introduction des conditions initiales%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

vf0=5.35e-004;

I0=[0.7032 ;  0.6918 ;  2.6752    ;      0      ;   0];        %Courant
Initiaux

%Conditions initiales.

X0=I0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%Définition des matrices à utiliser pour le modèle non saturé%%%%%.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Sous matrices de Xr
Xrd=[xff xfD; xfD(1) xDD(1) xfD(2);xfD(2) xfD(2) xDD(2)]; Xrq=[xQQ(1)
xmq;xmq xQQ(2)];
Xr1=[Xrd zeros(size(Xrd,1), size(Xrq,2)); zeros(size(Xrq,1),
size(Xrd,2)) Xrq];
Xr11=Xr1(1:nd+1, 1:nd+1); Xr22=Xr1(4:3+nq, 4:3+nq);
%Matrice Xrr
Xr = [Xr11
zeros(size(Xr11,1),size(Xr22,2));zeros(size(Xr22,1),size(Xr11,2))
Xr22];
%Matrice Xsr
Xsr=[xmd*ones(1,nd+1) zeros(1,nq); zeros(1,nd+1) xmq*ones(1,nq)];
%Matrice des résistances
Rr = diag([rf rD(1:nd) rQ(1:nq)]);
%Résistances au rotor
Rs = diag([ra ra]);
%Résistances au stator
crm=size(Rr);
Xs = diag([xd xq]);
%Inductances
Rm=[-Rs zeros(2,crm(2));zeros(crm(1),2) Rr];
%Matrice des résistances

%Matrice finale des inductances
Xm = [-Xs Xsr; -Xsr' Xr];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Définition des matrices fixes du système Saturé et non (Simulink)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

N3=[0 ;0 ;1 ;zeros(2,1)];
```

Rapport-Gratuit.com

```
E = [0 -1; 1 0];
flux0=Xm*X0;

Te0=(flux0(1)*I0(2))-(flux0(2)*I0(1));
%Tm=Te+D*wm;

%Facteur de Saturation
Delta=xmd/xmq;

% Définition des éléments à utiliser ds simulink
Gen=[nd; nq ;xf ;xmd; xmq ;xa; Delta; wn];
Xind=[xq; xd];
```

Programme dans la fonction fcn

```
function [S, Te, flux, So, Vt, Te2,Qr] = fcn(c1,omega,Rm,xn, ra, N3,
xc, rc, Gen,E,xD,xQ,xkf)
%#eml

nd=Gen(1); nq=Gen(2); xf=Gen(3); xmd=Gen(4); xmq=Gen(5);
Delta=Gen(7); wn=Gen(8); xa=Gen(6);
K=xn(1:3+nd+nq);

isd=-xn(1)+xn(4)+xn(3);
isq=-xn(2)+xn(5);

phimd=xmd*isd; phimq=xmq*isq;

Im=sqrt(isd^2+(isq^2/Delta));

phim=sqrt(phimd^2+(Delta*phimq^2));

xmds=phim/Im; xmqs=xmds/Delta;

%Calcul des inductances
xfD=[xmd+xkf(1) xmd+xkf(1)+xkf(2)];

% Calcul des inductances
xDD=[xfD(1)+xD(1) xfD(2)+xD(2)];
xd = xmds + xa;
xq = xmqs + xa;
xQQ = xmqs + xQ;

%Calcul de xff;
xff=xf + xmds;
for i=1:nd
xff = xff+ xkf(i);
end

Xs = diag([xd xq]);
```

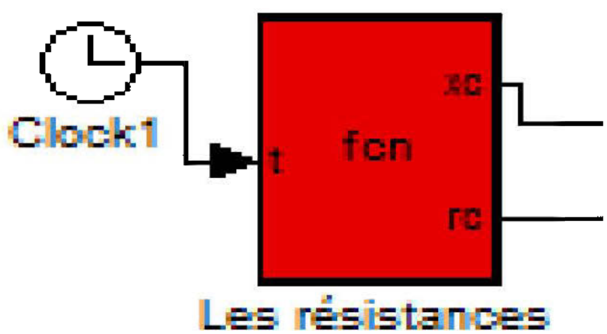
```
%Définition des matrices à utiliser.
%Sous matrices de Xr
Xrd=[xff xfD; xfD(1) xDD(1) xfD(2);xfD(2) xfD(2) xDD(2)]; Xrq=[xQQ(1)
xmqs;xmqs xQQ(2)];
Xr1=[Xrd zeros(size(Xrd,1), size(Xrq,2)); zeros(size(Xrq,1),
size(Xrd,2)) Xrq];
Xr11=Xr1(1:2, 1:2); Xr22=Xr1(4:4, 4:4);
%Matrice Xrr
Xr = [Xr11
zeros(size(Xr11,1),size(Xr22,2));zeros(size(Xr22,1),size(Xr11,2))
Xr22];
%Matrice Xsr
Xsr=[xmds*ones(1,2) zeros(1,1); zeros(1,2) xmqs*ones(1,1)];

Xm = [-Xs Xsr; -Xsr' Xr];

%Courant de champ
%Is=[xn(1);xn(2)];

%Dérivée du courant de champ
%dIs=[dxn(1);dxn(2)];

%Te=c2-2*H*dxn(6)-D*xn(6);

wm=omega;

%définition de la charge
Rc=diag([rc rc]); Xc=diag([xc xc]);

N2=[(1/wn)*Xc zeros(2,1+2);zeros(1+2,2) zeros(1+2,1+2)];
N1=[Rc+wm*E*Xc zeros(2,3);zeros(3,2) zeros(3,3)];

W = wm*[E zeros(2,3); zeros(3,2) zeros(3,3)];
% AP1=((1/wn)*Xm);
%
% AP2=N2-AP1;

Ac=((N2-(1/wn)*Xm)^-1)*(Rm+(W*Xm)-N1);
Bc=-(N2-(1/wn)*Xm)^-1*N3;

T2=(1/wn)*[-xd 0 xmd*ones(1,1+1) zeros(1,1); 0 -ra zeros(1,1+1)
xmq*ones(1,1)];                                        %Matrice de
commande du modèle d'état en courant
J2=T2*Bc;
T1=[-ra wm*xq zeros(1,1+1) -wm*xmq*ones(1,1); -wm*xd -ra
wm*xmd*ones(1,1+1) zeros(1,1)];
J1=T1+(T2*Ac);

Cc=[eye(5);J1]; Dc=[zeros(5,1);J2];
```

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES


```
%Calcul du flux

flux=Xm*K;

%Calcul de la tension de sortie.
%Vs=(Rc+wm*E*Xc)*Is+(1/wn)*Xc*dIs;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Définition des matrices du systhème global%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

S=Ac*xn+Bc*c1;
So=Cc*xn+Dc*c1;
%Tension Vt
Vt=sqrt(So(6)^2+So(7)^2);
%Courant It
It=sqrt(xn(1)^2+xn(2)^2);
%Puissance
tangphi=(xc/rc);
phi=atan(tangphi);
Te=Vt*It*cos(phi);%flux(2)*xn(1)-flux(1)*xn(2);
Te2=((So(6)*xn(1))+(So(7)*xn(2)));
Qr=((So(7)*xn(1))-(So(6)*xn(2)));
```

La charge



Structure des résistances dans simulink

Programme dans la fonction fcn

```
function [xc,rc] = fcn(t)
%#eml

rc=1; xc=0.3287;
if t<=20
    rc=1000; xc=1000;
else if ((t >20) && (t <= 40))
```

```
        rc=5; xc=-0.2;
        else if ((t >40) && (t <= 65))
        rc=7; xc=-0.2;
        else if ((t >65) && (t <= 90))
        rc=5; xc=-0.2;
        else if ((t >95) && (t <= 120))
        rc=0.9; xc=-0.2;
         else if t>120
        rc=0.8; xc=-0.2;
            end
            end
            end
            end
    end
end
```