

# **Modélisation des alternateurs hydroélectriques dans leur environnement**

**par**

**Cynthia MOUSSA**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE  
LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE  
M. Sc. A.**

**MONTRÉAL, LE 24 AVRIL 2021**

**ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Kamal Al-Haddad, directeur de mémoire  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Antoine Tahan, président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Arezki Merkouf, examinateur externe  
Institut de Recherche en Électricité du Québec Hydro-Québec

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 20 AVRIL 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## **AVANT-PROPOS**

Ce mémoire est réalisé dans le cadre de mes études aux cycles supérieurs à l'École de Technologie Supérieure. L'objectif initial de ma recherche appliquée en collaboration avec l'Institut de Recherche en Électricité du Québec d'Hydro-Québec (IREQ), cherchait à modéliser et à évaluer un modèle de simulation de l'alternateur hydroélectrique et ses modes de fonctionnement. L'originalité principale consiste dans l'étude du cas du système d'excitation et de ses mécanismes de défaillance en consultant une large revue bibliographique liée à cette problématique.

Notre recherche est documentée dans ce rapport et dans des publications scientifiques de la revue IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers



## **REMERCIEMENTS**

Veuillez croire à mes remerciements les plus dévoués et distingués.



# **Modélisation des alternateurs hydroélectriques dans leur environnement**

Cynthia MOUSSA

## **RÉSUMÉ**

L'intégration des circuits d'excitation prend son importance lors de l'analyse des effets non-linéaires de l'alternateur dans son environnement. Suivant les statistiques d'Hydro-Québec sur ses systèmes, le type d'excitation le plus répandu est statique. En effet, la plupart des alternateurs exploités par l'entreprise approchent tranquillement leur fin de vie utile et leur vieillissement est accéléré d'avantage par des phénomènes intrinsèquement liés à leur mode d'opération tel que échauffement des enroulements, vibrations d'origines électromagnétiques dues à la séquence de bobinage stator, défaut de court-circuit inter spires ou des barres, excentricité du stator ou du rotor pontage des bobine ou sectionnement des barres amortisseurs.

L'originalité et le but de mon mémoire sont axés sur l'étude de l'excitatrice dans des cas réels. Ainsi, le premier volet sera de réaliser la modélisation par éléments finis de l'alternateur hydroélectrique La Grande 4 par intermédiaire du logiciel de calcul Ansoft MAXWELL en couplage avec les modes de fonctionnement de son système d'excitation en environnement réel. Le second volet sera de déterminer les mécanismes de défaillance spécifiques aux systèmes d'excitation suivant un arbre hiérarchique. Ce volet a pour but d'effectuer le diagnostic. La problématique de recherche à ce niveau s'est d'étudier l'impact des systèmes d'excitation dans le cas de défauts sur les modes de fonctionnement de l'alternateur.

**Mots-clés:** Systèmes d'excitation, alternateurs hydro-électriques, jumeaux numériques, mécanismes de défaillances, diagnostic et sur-excitation, sous-excitation



# **Modeling of hydroelectric alternators in their environment**

Cynthia MOUSSA

## **ABSTRACT**

The integration of excitation circuits becomes important when analyzing the nonlinear effects of hydro-alternator in its environment. According to Hydro-Québec statistics, the most common excitation system used in hydropower stations is the static excitation. In fact, most generators operated by the Quebec's power plant, are quietly approaching their end of life and aging is accelerated by advanced stage of phenomenon, such as: heating coils, background electromagnetic vibrations, losses in the stator winding, short circuit fault in inter-turn bars, eccentricity of the rotor or the stator, disconnection of the damper bars etc.

The originality and the purpose of my work are focused on the study of the exciter in real case environment. Therefore, the first part of my project is to realize the finite element modeling of the hydropower alternator La Grande 4 using MAXWELL – Ansys in case study representing different failure modes of its excitation. The second part of my project is to do the diagnostic of excitation systems by defining the failure mechanisms through a hierarchical tree. The last part, will offer the opportunity to do the diagnostic of excitation systems by gathering and validating the Failure Modes and Effect Analysis trees. Finally, the problematic we aim to solve at this level is to study the impact of excitation systems over the hydropower generator and to analyze it in case of failures.

**Keywords:** excitation systems, hydroelectric alternators, digital twins, failure mechanisms, diagnostic and over-excitation, under-excitation.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DE l'ART .....	3
1.1 La modélisation par éléments-finis.....	3
1.1.1 Revue des travaux scientifiques sur les éléments-finis .....	3
1.2 Les systèmes d'excitation .....	7
1.2.1 Historique des systèmes d'excitation des alternateurs hydro-électriques ....	7
1.2.2 Revue des travaux scientifiques sur les circuits d'excitation complets.....	9
1.3 Les mécanismes de défaillances et le redresseur AC/DC .....	10
1.3.1 Introduction .....	10
1.3.2 Historique de l'évolution du diagnostic et son application chez Hydro-Québec .....	10
1.3.3 Méthodes de détection de défauts dans les convertisseurs statiques.....	15
1.4 Les jumeaux numériques .....	19
1.4.1 Objectif et pertinence des jumeaux numériques .....	20
1.4.2 Revue des travaux scientifiques sur les jumeaux numériques .....	21
1.5 Conclusion .....	24
CHAPITRE 2 MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS DE L'ALTERNATEUR HYDRO-ÉLECTRIQUE .....	27
2.1 Introduction.....	27
2.2 Développement théorique des équations de Maxwell .....	27
2.3 Conception électromagnétique de l'alternateur hydro-électrique.....	30
2.4 Tests de validation .....	34
2.4.1 Test à vide conforme à la norme IEEE 115 .....	34
2.4.2 Test en court-circuit permanent conforme à la norme IEEE 115.....	36
2.5 Essai à vide .....	37
2.6 Conclusion .....	39
CHAPITRE 3 SYSTÈMES D'EXCITATION DES ALTERNATEURS HYDRO- ÉLECTRIQUES .....	41
3.1 Les systèmes d'excitation pour la génératrice synchrone.....	41
3.1.1 Catégorie rotative; excitation de type machine à courant continu DC.....	41
3.1.2 Catégorie rotative; excitation de type machine à courant alternatif AC (Alternative Current).....	42
3.1.3 Catégorie statique; excitation de type statique ST (Static) .....	43

3.1.4	Contribution à la compréhension du système d'excitation dans l'environnement industriel et de recherche .....	45
3.2	Système de contrôle, système de protection et principaux équipements .....	46
3.3	Exigences et fonctionnalités rapportées au fonctionnement du système d'excitation.....	50
3.4	Comparaison entre les différentes caractéristiques des types d'excitation .....	52
3.5	Modes opérationnels de l'alternateur hydro-électrique La Grande 4 .....	53
3.5.1	Hypothèses imposées dans la simulation par éléments-finis de Maxwell .....	56
3.6	Hypothèses d'étude et résultats des modes de fonctionnement de l'excitation de l'alternateur hydro-électrique La Grande 4.....	57
3.7	Conclusion .....	64
 CHAPITRE 4 MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE DES SYSTÈMES D'EXCITATION.....		65
4.1	Mise en contexte .....	65
4.2	AMDE.....	65
4.2.1	Méthodologie .....	66
4.3	Validation des arborescences des systèmes d'excitation.....	67
4.3.1	Mécanismes du système d'excitation rotatifs.....	68
4.3.2	Mécanisme du système d'excitation statique .....	72
4.4	Conclusion .....	73
 CONCLUSION .....		75
 LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		77

## **LISTE DES TABLEAUX**

	Page
Tableau 2.1 Caractéristiques électriques et mécaniques de La Grande 4 .....	31
Tableau 3.1 Performances des différents systèmes d'excitation.....	52
Tableau 3.2 Caractéristiques obtenues de La Grande 4 pour les modes de fonctionnement.....	60



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Classification des approches de pronostic .....	14
Figure 1.2 Le modèle de ‘digital twin’ de la NASA .....	23
Figure 2.1 Symétrie magnétique fraction du modèle de La Grande 4 .....	33
Figure 2.2 Valeur efficace des tensions induites de l’essai à vide .....	35
Figure 2.3 Tension induite en fonction du courant d’excitation de l’essai à vide et de réception .....	36
Figure 2.4 Droite de l’essai de court-circuit permanent au moment de validation de l’alternateur hydro-électrique .....	37
Figure 2.5 Courbes des tensions induites triphasées à vide de La Grande 4.....	38
Figure 2.6 Induction magnétique spatiale à vide en fonction des degrés normalisés, pour $t=0.63\text{s}$ .....	38
Figure 2.7 Résultat de la carte des champs à vide de La Grande 4 .....	39
Figure 3.1 Modèle suivant la norme IEEE 421 d’une excitation machine à courant continu .....	42
Figure 3.2 Modèle suivant la norme IEEE 421 d’une excitation machine à courant alternatif ‘brushless’ .....	43
Figure 3.3 Modèle suivant la norme IEEE 421 d’une excitation statique avec redresseur commandé à source de tension.....	44
Figure 3.4 Système de contrôle du système d’excitation d’un alternateur hydro-électrique .....	46
Figure 3.5 Schéma de compensateur de charge .....	47
Figure 3.6 Courbe de capacité de La Grande 4 incluant ses limites d’opération .....	54
Figure 3.7 Circuit externe partiel en mode sous-excité du modèle 2D de La Grande 4 .....	59

Figure 3.8	Distribution de la densité de courant J dans les barres amortisseurs du rotor .....	61
Figure 3.9	Distribution spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer de La Grande 4 .....	62
Figure 3.10	Courant dans les quatre barres amortisseurs en mode de fonctionnement sur-excité .....	63
Figure 3.11	Induction magnétique spatiale à charge nominale de La Grande 4 .....	64
Figure 4.1	Stratégie de définition de l'arbre de défaillance pour les types de système d'excitation .....	67
Figure 4.2	Arborescence du mécanisme de défaillance 1 validé .....	68
Figure 4.3	Arborescence du mécanisme de défaillance 2 validé .....	69
Figure 4.4	Arborescence du mécanisme de défaillance 3 validé .....	70
Figure 4.5	Arborescence du mécanisme de défaillance 4 validé .....	71
Figure 4.6	Arborescence du mécanisme de défaillance 5 validé .....	72
Figure 4.7	Arborescence du mécanisme de défaillance validé .....	73

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

$\sigma$	Conductivité de la région étudiée
$\omega$	Vitesse de rotation de la machine en tour par minute
%	Pourcentage
2D	Représentation graphique en deux dimensions
A	Vecteur potentiel
AC	Alternative Current- Courant alternatif
AMDE	Analyse des Modes de Défaillance et des Effets
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance de Cause à Effets
B	Induction magnétique radiale
Bradiale	Induction radiale en Tesla
Brushless	Machine sans balais
DC	Direct Current- Courant continu
DET	Probabilité de détection d'échec
$E_{f_1}$	Intersection entre la courbe essai à vide et la droite d'entrefer pour un courant d'excitation nominal $I_{fn}$ (spécifications de la machine)
$E_N$	Tension de base ligne –neutre en Volts V
fmm	Force magnétomotrice
FP	Facteur de puissance
H	Champ magnétique
$I_{cc_1}$	Intersection entre la courbe essai en court-circuit et la droite d'entrefer pour un courant d'excitation nominal $I_{fn}$ (spécifications de la machine)
IEEE	Institut of Electrical and Electronics Engineers

If ou I	Courant d'excitation en Ampère
In	Courant de phase nominal
J	Densité du courant
$k_{c,\text{rotor}}$	Facteur défini en assumant la surface du stator lisse
$k_{c,\text{stator}}$	Facteur défini en assumant la surface du rotor lisse
MAC	Machine à courant alternatif
MCC	Machine à courant continu
MIDA	Application web diagnostic alternateur
Néchantillons	Nombre d'échantillons
$N_{\text{encoche}}$	Nombre d'encoche
P	Puissance active en mégawatt
$R_a$	Résistance supposée $\ll X_s$
S	Puissance apparente en mégavoltampère
ST	Static
$U_{\text{induite}}$	Tension induite
$U_{\text{crête théorique}}$	Tension crête théorique
Vph	Tension de phase en Volt
Vch	Tension aux bornes de la charge en Volt
$\omega_{\text{rotation}}$	Vitesse de rotation
$X_s$	Réactance synchrone
$Y_{\text{étoile}}$	Type de connexion
$\hat{z}$	Vecteur unité dans la direction z, x, y coordonnées cartésiennes dans le plan radial
$Z_N$	Impédance de base en Ohm

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

<b>Moment d'une force</b>	
kN.m	kilo Newton mètre
<b>UNITÉS DE VITESSE DE ROTATION</b>	
RPM	tour par minute
tr/min	tour par minute
<b>UNITÉ DE COUPLE</b>	
MN.m	méga Newton par mètre
<b>Puissance</b>	
MVA	mégavoltampère
MVar	mégavar
W	watt
<b>UNITÉ DE GÉOMÉTRIQUE</b>	
Longueur	
mm	millimètre
<b>UNITÉ MECANIQUE</b>	
Angle plan	
°	degré (unité de position)
<b>UNITÉS DE TEMPS</b>	
s	seconde
ms	millisecondes
<b>UNITÉS DES BASE</b>	
pu	per unit
mag	magnitude

<b>UNITÉ ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE</b>	
Intensité de courant électrique	
A	ampère
<b>UNITÉ OPTIQUE</b>	
Angle solide Fréquence	
Hz	hertz
<b>Différence de potentiel (ou tension)</b>	
Force électromotrice	
V	volt
<b>Résistance et conductance électriques</b>	
MΩ	mégohm
<b>Capacité électrique</b>	
F	farad
<b>UNITÉ DE DENSITE DE COURANT ELECTRIQUE</b>	
A/m <sup>2</sup>	unité de la densité du courant en Ampère par mètre carré
<b>UNITÉ DE DENSITE DE FLUX MAGNETIQUE</b>	
T	tesla
<b>UNITÉ DE FLUX MAGNETIQUE</b>	
Wb/m	weber par mètre

Source : Bureau de normalisation du Québec (1977), *Système international d'unités (SI) principes d'écriture des unités et des symboles* (BNQ 9990-911) Québec : ministère de l'Industrie et du Commerce.



## INTRODUCTION

Après la nationalisation de l'électricité québécoise le 1<sup>er</sup> mai 1963, Hydro-Québec devient un monopole de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique dans la province. Son unique actionnaire étant le gouvernement du Québec, l'entreprise exploite essentiellement des sources d'énergies renouvelables et plus particulièrement l'hydraulique. Aujourd'hui avec une puissance de 36 643 mégawatts (suivant hydro Quebec.com) installée sur soixante-deux centrales, Hydro-Québec est le plus grand producteur mondial d'hydroélectricité.

La planification de la production d'énergie est de plus en plus ardue. La déréglementation des marchés et les préoccupations grandissantes liées aux émissions de gaz à effet de serre exercent une pression sur les propriétaires de centrales électriques pour que ces derniers exploitent leurs installations de manière plus efficace. Les gestionnaires appréhendent la concurrence de l'exportation de cette énergie verte en satisfaisant déjà les contraintes sur les émissions mais en faisant face à des rythmes de production croissants et variables qui soumettent les équipements à un stress important qui accélère leur dégradation et leur vieillissement.

Avec cette approche, on appréhende l'arrivée d'un nombre important de groupes à leur fin de vie à la même période à cause de certains phénomènes défaillants liés à leur mode d'opération, tel que : les tensions d'arbre provenant du système d'excitation, les vibrations d'origine électromagnétique au niveau de l'alternateur ou le sectionnement des barres d'amortissement. Pour vaincre ces conditions d'exploitation, un grand intérêt est exprimé pour des méthodes et des outils permettant de déterminer les moyens pour les rénovations majeures de ces groupes qui vont permettre de répondre à la demande tout en respectant un large éventail de contraintes liés aux ressources, à la fiabilité des installations, suivant PHM Prognostics and Health Management pour le diagnostic.

À cet effet, dans le projet de recherche intitulé :«Modélisation des alternateurs hydroélectriques dans leur environnement», nous visons l'étude d'un élément important et fondamental dans le fonctionnement du groupe turbine-alternateur: excitation.



# CHAPITRE 1

## ÉTAT DE L'ART

### 1.1 La modélisation par éléments-finis

#### 1.1.1 Revue des travaux scientifiques sur les éléments-finis

Plusieurs études parlent de la modélisation par éléments finis dans le cas des machines électriques tournantes. Intégrant des modèles de sous-systèmes validés indépendamment, les auteurs Darabi et al. (2004) proposent<sup>1</sup> un modèle de petit groupe de production de machine synchrone avec excitation sans balai. Leur modèle est constitué de trois parties le générateur, le régulateur de tension automatique analogique et le modèle basé sur les ‘self-inductances’ et les inductances mutuelles de la machine d'excitation et de son pont de diodes redresseur. Ils ont découvert que pour des charges balancées ou équilibrées, lors de l'utilisation d'une grande charge inductive, s'il y avait une grande chute pendant les premiers cycles du transitoire, la tension de sortie du régulateur de tension automatique ne pouvait pas garantir la récupération rapide de la tension du générateur. Ils ont trouvé que le facteur distinguant des conditions équilibrées des conditions de déséquilibre est l'apparition de grandes harmoniques supplémentaires (100 Hz) du côté du rotor [1].

D'autre part, les auteurs Zhu et al. (2007) présentent dans leur article<sup>2</sup> un système de co-simulation qui permet à l'analyse par éléments-finis et au simulateur de circuit d'excitation de fonctionner simultanément tout en offrant une intégration étroite et une capacité d'échange de données transparentes [2]. Ils proposent une approche originale de co-simulation transitoire qui considère le couplage indirect du circuit d'excitation afin d'anticiper les performances

---

<sup>1</sup> A. Darabi, C. Tindall, and S. Ferguson, “Finite-element time-step coupled Generator, Load, AVR, and brushless exciter modeling,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 2, pp. 258-264, 2004.

<sup>2</sup> X. Zhu, M. Cheng, W. Zhao, C. Liu, and K. T. Chau, “A Transient Cosimulation Approach to Performance Analysis of Hybrid Excited Doubly Salient Machine Considering Indirect Field-Circuit Coupling,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 6, pp. 2558-2560, 2007.

électromagnétiques de la machine de façon plus fiable. Les auteurs affirment que leur méthode est efficace et flexible, mais plus important encore, précise et fiable.

En contrepartie, les auteurs Rosselet, Xuan et al. (2011)<sup>3</sup> prennent [3] en compte un système d'équation non-linéaires avec une précision en utilisant un modèle d'éléments-finis d'une machine électrique dans un solveur de réseau. Le couplage est considéré comme la résolution d'un système d'équations en utilisant la méthode Newton. En comparant leurs résultats à ceux générés par le logiciel commercial ils ont découvert que les courants de lignes et le couple électromagnétique calculés dans leur configuration étaient viables dû à de petites différences dans le maillage et au temps de calcul. Ils concluent alors que leur méthode de couplage suggérée est idéale pour lier un modèle élément-fini avec un logiciel de simulation de réseau, tout en tenant compte des non linéarités d'une machine électrique précisément lors de la simulation du comportement transitoire d'un système d'alimentation avec une configuration quelconque.

Alors que les auteurs Dallas et al. (2011) étudient<sup>4</sup> le comportement d'une génératrice connectée au réseau 60 Hz lors d'un défaut de court-circuit à l'aide de la méthode des éléments-finis sur deux cas [4]. Le premier cas, où la vitesse du rotor reste constante et égale au cas synchrone. Dans le second cas, la vitesse du rotor est gérée par un régulateur proportionnel intégral qui modifie le couple appliqué dans la machine. De même, les auteurs Khalf, Wamkeue et al. (2012)<sup>5</sup> étudient la modélisation par éléments-finis sur les petites machines synchrones [5]. Leur expérimentation se basent sur des tests de court-circuit triphasé brusque pour démontrer que les machines électriques synchrones sont robustes. En fin, les auteurs utilisent des formules sur les états magnétostatiques et transitoires à échelons de temps pour analyser les caractéristiques électromagnétiques et pouvoir prédire la performance en régime permanent.

---

<sup>3</sup> G. Rosselet, M. T. Xuan, and J. J. Simond, "Finite Element Model of Electrical Machines Coupled to the Grid Simulation Software," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1127-1133, 2011

<sup>4</sup> S. E. Dallas, A. N. Safacas, an d J. C. Kappatou, "Comparison of the hydrogenerator behavior during a field short-circuit in case with and without PI-controller using FEM." pp. 383-388

<sup>5</sup> M. A. Khalf, R. Wamkeue, and D. Aguglia, "Finite element approach for performances prediction of a small synchronous generator using ANSYS software." pp. 1-4.

Aussi, les auteurs Tessarolo, Bassi et al. (2012) suggèrent dans<sup>6</sup> d'examiner un alternateur construisant des prototypes complets et les testant avec différentes conceptions de cage d'amortisseur [6]. Ils découvrent que les simulations par éléments finis donnent des résultats précis si des anneaux d'extrémité continus sont utilisés pour court-circuiter les barres d'amortissement. Ainsi du point de vue expérimental : un changement dans le nombre de barres d'amortissement par pôle influence de façon négligeable les performances et les paramètres de la machine; par contre, la suppression des connexions dans les zones d'extrémité de court-circuit introduit une grande saillance sub-transitoire, qui affecte sérieusement les opérations de la machine pendant les défauts de court-circuit entre phases.

Les auteurs Aguiar, Merkhouf et al. (2014) soulignent dans<sup>7</sup> comment les résultats de la modélisation électromagnétique et de la simulation des générateurs hydroélectriques peuvent être influencés par la densité de maillage, les propriétés des matériaux magnétiques, le courant d'excitation et l'épaisseur de l'entrefer [7]. Ils ont utilisé l'analyse par éléments-finis pour mesurer l'effet relatif de ces variables sur une symétrie magnétique d'un hydro générateur de 122.6 MVA, 13.8 kV, 60 Hz, 60 pôles et 504 encoches. Ainsi, ils ont découvert que s'ils choisissaient une densité de maillage provenant d'une partie du générateur contenant des densités de puissance induites plus élevées y compris les dents de la face polaire et du stator, la variation des pertes de noyau magnétique calculées était négligeable. En même temps, leur étude montre que le maillage doit être choisi plus sélectivement si le but de la simulation est de prédire le profil de distribution des pertes. Ils ont également découvert que leurs résultats de perte totale de noyau magnétique, mesurés dans des conditions de charge nominale, variaient d'au moins 25%, selon les conditions de charge du stator. Puisque la prédiction adéquate de la perte de noyau local magnétique repose sur la forme de l'entrefer, ils soutiennent qu'un modèle complet qui calcule l'effet de la forme de l'entrefer elliptique et excentrique sur les pertes magnétiques doit être développé. Les difficultés de modélisation par

---

<sup>6</sup> A. Tessarolo, C. Bassi, and D. Giulivo, "Time-Stepping Finite-Element Analysis of a 14-MVA Salient-Pole Shipboard Alternator for Different Damper Winding Design Solutions," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 6, pp. 2524-2535, 2012.

<sup>7</sup> A. B. M. Aguiar, A. Merkhouf, C. Hudon, and K. Al-Haddad, "Influence of the Variation of the Input Parameters on the Simulation Results of a Large Hydrogenerator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 1, pp. 261-268, 2014.

éléments-finis comprenaient des différences dans les entrefers opérationnels et induit des déviations de courant d'excitation de charge par rapport aux mesures d'excitation de charge réelles. Néanmoins, les auteurs maintiennent qu'ils ont conçu un modèle de travail en raison de leur quantification de l'influence de la mèche, du matériau magnétique, du courant d'excitation et de la taille de l'entrefer. En addition, puisque les pertes de noyau magnétique provoquent le chauffage localisé des alternateurs hydro-électriques, il est extrêmement important que l'on comprenne la distribution et le comportement du flux de rotation. Les auteurs Akiror, Pillay et al. (2016) dans leur article<sup>8</sup> étudient en se basant sur la méthode des éléments-finis la distribution du flux de rotation d'un hydro générateur lorsque son matériau de base est saturé [8]. Les tests expérimentaux ont été menés sur un modèle 2D dans une analyse par éléments-finis avec une géométrie de machine de 6 m de diamètre d'alésage. Dans le but d'optimiser le temps de calcul et de sauver une mémoire de donnée, la moitié de la machine a été simulée dans une symétrie magnétique de la séquence d'enroulement qui respecte les conditions aux limites de Dirichlet.

Par ailleurs, les auteurs Filleau et al. (2016) présentent une méthodologie originale pour la modélisation de machines qui peut être appelée processus de co-simulation<sup>9</sup> et qui est un outil précieux pour le diagnostic des générateurs car il fournit des représentations spectrales plus précises des différentes grandeurs physiques étudiées [9]. La validité de la méthodologie de modélisation est illustrée par une comparaison spectrale. Les inductances du système sont décrites avec précision par des éléments finis, qui tiennent en compte les spécificités géométriques de l'excitatrice et du générateur principal. Finalement, autre méthodologie a été testée exprimant une limitation par rapport au modèle discuté car sa représentation harmonique spectrale obtenu est biaisée.

De plus, les auteurs Babić, Milić et al. (2016) dans<sup>10</sup> présentent [10] un algorithme de détection de fautes qu'ils ont testé dans un système de surveillance magnétique en mode

<sup>8</sup> J. C. Akiror, P. Pillay, and A. Merkhouf, "Effect of Saturation on Rotational Flux Distribution in Hydro Generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 4, pp. 1657-1664, 2016.

<sup>9</sup> P. Maussion, "Fine Power Alternator Modelling For Diagnosis Purposes by Means of Flux2D\Matlab Co-simulation," 2016.

<sup>10</sup> B. M. Babić, S. D. Milić, and A. Ž. Rakić, "Fault detection algorithm used in a magnetic monitoring system of the hydrogenerator," *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 1, pp. 63-71, 2017.

‘online’ de la centrale hydroélectrique. Leur algorithme synthétise le flux magnétique radial principal dans l’entrefer, le flux de fuite magnétique radial au niveau du stator ainsi que les vibrations mécaniques de l’hydro générateur au niveau de ses paliers guides. En faisant cela, la détection de défaut et la surveillance magnétique de cette machine, sont garanties. Enfin, les auteurs Akiror, Pillay et al. (2017) examinent dans<sup>11</sup> la modélisation par éléments finis d’un grand hydro générateur. Afin d’étudier les paramètres du modèle, comme la réponse de la tension en circuit ouvert, on a roulé une simulation 2D en tenant compte de la profondeur du modèle, de l’entrefer effectif, et de la courbe B-H du matériau, ont été considérés [11]. Différents résultats obtenus à partir de simulations menées sur différentes machines ont été attribuées à des changements dans les propriétés des matériaux et la longueur d’entrefer. Enfin, les auteurs déclarent que leur travail valide la nécessité de tester le modèle de l’hydro-générateur avant de les utiliser dans des études ultérieures ou faire des conceptions comparatives.

## 1.2 Les systèmes d’excitation

### 1.2.1 Historique des systèmes d’excitation des alternateurs hydro-électriques

Les systèmes d’excitation ont subi une évolution remarquable contribuant à une meilleure performance électrique et mécanique sur le groupe de production turbine-alternateur. Au début en 1920, les systèmes d’excitation des alternateurs se constituaient de machines tournantes appliquant un courant continu à une barre de connexion. Les deux types; excitatrice tournante à courant continu ou excitatrice tournante à courant alternatif, fonctionnaient en prenant leur puissance mécanique directement de l’arbre de la turbine pour la transformer en une puissance électrique.

Après 1950, l’avancement technologique rapide au niveau des semi-conducteurs ayant des performances supérieures à celles des machines tournantes, introduira un nouveau type

---

<sup>11</sup> J. Akiror, P. Pillay, and A. Merkhouf, “Challenges in Modeling of Large Synchronous Machines,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017

d'excitation; l'excitation statique. Avec leurs coûts plus compétitifs, les manufacturiers commencent à fabriquer des systèmes d'excitation statiques qui remplacent les machines tournantes. À cette époque, les réseaux étaient plus courts aux alentours de 100 km, moins puissants avec une puissance moyenne des alternateurs de 30 MW et les exigences sur le circuit d'excitation étaient moins sévères. Jusqu'à l'accident du premier Blackout Nord-Est Américain et Ontarien en 1965. Cet accident ne fut pas le dernier. Par la suite, d'autres coupures de courant ont eu lieu et la nécessité d'améliorer la coordination entre la protection de l'alternateur et son circuit de contrôle devient de plus en plus urgente. Ceci changea la politique adoptée et imposa des contraintes supplémentaires [12].<sup>12</sup>

À ce moment, les organismes comme le 'North American Electrical Reliability Corporation-NERC' et le 'Northeast Power Coordinating Council-NPCC' naissent pour fixer les critères du territoire. Le NERC demande aux fournisseurs de vérifier la coordination au niveau de l'excitatrice et au niveau de l'alternateur hydro-électrique. Plusieurs ajustements ont été implantés. Parmi ces contraintes supplémentaires qui ont touché le système d'excitation, on cite [13] [14]: un plafond de tension positif élevé, un plafond de tension négatif élevé, un plafond de courant plus élevé, un temps de réponse plus rapide, etc.<sup>13 14</sup>. Les sociétés scientifiques IEEE et IEC ont mis en œuvre des normes afin de standardiser ces procédures et pouvoir les généraliser et les mettre à jour à chaque période [15] [16]<sup>15 16</sup>.

---

<sup>12</sup> K.Slimani, "État de l'art sur les systèmes de production d'énergie électrique utilisant des alternateurs , " I.R.E.Q., Hydro-Québec2005.

<sup>13</sup> K.Slimani, "État de l'art sur les systèmes de production d'énergie électrique utilisant des alternateurs , " I.R.E.Q., Hydro-Québec2005.

<sup>14</sup> K.Slimani, "Calcul de la valeur économique pour la solution qui utilise des excitatrices à convertisseur électronique tournant," I.R.E.Q., Hydro-Québec 2005.

<sup>15</sup> K.Slimani, "État de l'art sur les systèmes de production d'énergie électrique utilisant des alternateurs , " I.R.E.Q., Hydro-Québec2005.

<sup>16</sup> K.Slimani, "Calcul de la valeur économique pour la solution qui utilise des excitatrices à convertisseur électronique tournant," I.R.E.Q., Hydro-Québec 2005.

### 1.2.2 Revue des travaux scientifiques sur les circuits d'excitation complets

L'auteur Shaefer affirme dans son article [17] que les défaillances du système d'excitation causent de sérieux problèmes aux systèmes de production dans l'industrie<sup>17</sup>. Il ajoute que le problème peut être résolu en remplaçant l'excitatrice rotative par un équipement du système d'excitation statique. L'analyse révèle que la détérioration des paliers par apparition de piqûres, y compris les commutations de thyristors dans les ponts redresseurs de puissance à excitatrice statique aboutissent à des décharges électrostatiques.

Les auteurs Azuaje, Gomez et al. dans leur article<sup>18</sup> examinent les oscillations de puissance que l'alternateur hydro-électrique de 805 MVA. Les résultats obtenus par leur expérience indiquent que les modifications de réglage étaient un moyen efficace d'amortir les oscillations de puissance à charge élevée [18].

L'auteur P. Butros étudie dans son mémoire [19] un nouveau type de système d'excitation sans balai à courant contrôlé utilisé pour les alternateurs hydro-électriques<sup>19</sup>. Il introduit un procédé qui redresse le courant induit en utilisant un système d'excitation amélioré avec un pont à douze impulsions. Sa méthode a permis d'annuler l'harmonique du 6<sup>ème</sup> ordre et il a découvert que le filtre RL passe-bas de premier ordre recommandé est suffisamment bon pour réduire les harmoniques générées côté alternatif du pont redresseur.

Les auteurs Jain, Dubay et al. dans leur article [20] ont cherché à découvrir la cause exacte des problèmes de tension d'arbre dans une machine synchrone ayant leur principale préoccupation l'étude des signaux au niveau de l'arbre de la machine<sup>20</sup> tout en adoptant l'analyse de Fourier pour le traitement des signaux de tensions rotoriques.

---

<sup>17</sup> R. C. Schaefer, "Applying static excitation systems," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no. 6, pp. 41-49, 1998.

<sup>18</sup> C. J. Azuaje, and V. M. Gomez, "Evaluation of Excitation System Effect on Power Oscillations at Full Load of an 805 MVA Hydrogenerator." pp. 1-6.

<sup>19</sup> P. Butros, "simulation of rotating brushless AC excitation system with controlled thyristor bridge rectifier for hydropower generators ", UPPSALA Universitet 2011.

<sup>20</sup> Y. S. Murty, G. K. Dubey, and R. M. K. Sinha, "Fault Diagnosis in Three-Phase Thyristor Converters Using Microprocessor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 6, pp. 1490-1497, 1984

## 1.3 Les mécanismes de défaillances et le redresseur AC/DC

### 1.3.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, l'évolution des études dans le domaine des systèmes industriels permet de présenter des systèmes de plus en plus performants. Malgré toute cette évolution nul système n'est à l'abri d'une défaillance. La discipline scientifique de la sûreté de fonctionnement, dont l'origine remonte aux années 1950, a suscité l'intérêt de nombreux organismes publics et privés, nationaux et internationaux. La science de défaillance englobe des notions essentielles telles que la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité de n'importe quel système industriel de haute technologie tels que l'industrie nucléaire, les industries spatiales et aéronautiques aussi bien que les grandes entreprises et le monde des petites et moyennes entreprises. Pour cela on porte aujourd'hui un grand effort sur la surveillance et le diagnostic des systèmes industriels et plus particulièrement le diagnostic des convertisseurs statiques.

### 1.3.2 Historique de l'évolution du diagnostic et son application chez Hydro-Québec

Grâce aux systèmes d'excitation, l'alternateur hydro-électrique est capable de générer de l'électricité à allures folles ou bien à haute qualité. Du côté sécuritaire, ces systèmes sont potentiellement dangereux. Pour cela, recourir à des méthodes d'évaluation de leur infaillibilité constitue un tournant dans l'histoire des types des systèmes d'excitation.

L'AMDEC est une des méthodes de fiabilité mais elle n'est pas la seule. Elle est une méthode générale d'analyse du risque, utilisable dans tous les domaines. Elle propose une échelle d'évaluation de 1 à 5 pour évaluer la probabilité de détection d'échec. Par conséquent, on définit l'analyse des modes de défaillances des causes à effet étant une détection de défaillance comme la probabilité de détecter une défaillance sur la base de symptômes mesurables. À partir de cette méthode globale, il y aura lieu d'élaborer un outil adapté à un domaine ou à un problème spécifique. Un bref historique rappel l'origine 'outre Atlantique' de l'AMDEC. En

conséquence, vous rencontrerez probablement dans des ouvrages, des normes ou des manuels les expressions suivantes, en langue anglaise :

- le ‘FMEA’: le ‘Failure Mode and Effects Analysis’.
- le ‘FMECA’: le ‘Failure Modes, Effects and Criticality Analysis’.

L’exposé historique est le suivant:

**1950 -1960:** aux Etats-Unis apparition des méthodes d’analyse dans le domaine de l’armement nucléaire et aéronautique, identification de l’effet des défaillances sur le personnel, sur la réussite des missions assignées.

**En 1966 :** Recht J.L. ‘Failure mode and effect’ National Safety Council, 1966, créée aux États-Unis par la société Mc Donnell Douglas. Elle consistait à dresser la liste des composants d’un produit et à cumuler des informations sur les modes de défaillance, leur fréquence. La méthode a été mise au point par la NASA et le secteur de l’armement sous le nom de Failure Mode and Effect Analysis pour évaluer l’efficacité d’un système. Dans un contexte spécifique, cette méthode est un outil de constance. À la fin des années soixante-dix, la méthode fut largement adoptée par des grands constructeurs d’automobiles et dans les industries suivantes : spatiales, armement, mécanique, électronique, électrotechnique, automobile, nucléaire, aéronautique, chimie, informatique et plus récemment, on l’applique dans les services.

**En 1970:** utilisation des méthodes dans l’évaluation des risques, dans l’industrie chimique. Les concepts, les méthodes de fiabilité traversent vers l’application initiale dans les domaines nucléaires et aéronautiques en Europe et en France, puis progressivement dans d’autres secteurs : analyse préliminaire des risques, analyse des modes de défaillance et de leurs effets et de leur criticité, méthodes plus mathématiques fondées sur les calculs probabilistes, les temps transitoires d’un état physique à l’autre.

**En 1980:** début de l’introduction des clauses de fiabilités dans les mandats relatifs aux machines et aux équipements de production. Ces clauses prévoient la réalisation d’une AMDEC et sont ensuite utilisées fréquemment dans d’autres secteurs. Cette technique a pour

but d'étudier, d'identifier, de prévenir ou au moins de réduire les risques de défaillance d'un processus ou d'un produit.

Deux aspects se dégagent de la méthode ; quantitatif et qualitatif.

L'aspect qualitatif de l'étude consiste à recenser les défaillances potentielles des fonctions du système étudié, de rechercher et d'identifier les causes des défaillances et d'en connaître les effets qui peuvent affecter les clients, les utilisateurs et/ou l'environnement interne ou externe.

L'aspect quantitatif consiste à estimer le risque associé à la défaillance potentielle. Le but de cette estimation est l'identification et la hiérarchisation des défaillances graves. Celles-ci sont alors mises en évidence en appliquant certains critères dont, entre autres, l'impact sur la recherche et la prise d'actions prioritaires qui doivent diminuer l'impact sur les clients ou qui élimineraient complètement les causes des défauts potentiels.

La méthode possède des étapes qui s'inscrivent dans une démarche de trois étapes fondamentales. Comme dans plusieurs démarches ; il y a une phase préparatoire qui consiste en une collecte de données pour réaliser l'étude, la mise sur pied d'un groupe de travail et la préparation des fichiers, tableaux, logiciels, etc.

On élabore sur l'importance de l'étape de constitution d'un groupe de travail pour élaborer l'AMDEC ; il s'agit de constituer l'équipe multidisciplinaire qui aura à réaliser l'étude. Les personnes impliquées dans un processus AMDEC et qui représentent les services des études, des achats, du marketing, de la maintenance, de la qualité, des méthodes et de la fabrication. La présence d'un animateur bien formé dans le groupe à des techniques spécifiques de la démarche et du travail en équipe est une condition de succès de l'application de la méthode. Ainsi, la clé du succès de l'équipe AMDEC réside essentiellement dans l'engagement total de ses membres et l'interaction entre ceux-ci.

Cette appropriation n'a peut-être pas toujours été réalisée à bon escient par les référentiels, la façon dont la méthode est mise en œuvre dans un cadre définis, avec des préoccupations spécifiques ainsi que les résultats auxquels on parvient, ne sont pas forcements transposables

dans d'autres domaines mais elle a contribué à propager la méthode AMDEC, ici dans la nouvelle France et plus particulièrement chez Hydro-Québec.

Une amélioration significative a été réalisée sur le diagnostic au cours de la dernière décennie comme explique Schwabacher et Goebel [21]<sup>21</sup>. La détection de défaillance est définie comme la probabilité de détecter une défaillance sur la base de symptômes détectables. Elle propose une échelle d'évaluation de 1 à 5 pour évaluer la probabilité de détection d'échec notée DET.

À Hydro-Québec, différents outils de diagnostic ont été développé et mis en place pour évaluer les centrales hydroélectriques à l'aide d'une application [22] web MIDA<sup>22</sup>. Sur cette extrémité, on retrouve l'approche basée sur les modèles physiques et qui repose sur la physique de la dégradation et d'autres guidées par les données provenant par exemple, de mesures indirectes de diagnostic, d'analyse de tendances ou de méthodes d'intelligences artificielles.

La technique des mécanismes de défaillance constitue ainsi un système structuré utilisant l'ensemble des informations pertinentes. Bien qu'appliquer aux alternateurs hydro-électriques se veut universelle et pourrait être transposée à d'autres équipements électriques comme les systèmes d'excitation dans le cadre de l'étude actuelle. Les approches de diagnostic peuvent se diviser en trois grandes familles qui sont tributaires des données disponibles comme expliquer par Roemer Gallie et al. dans leur article [23]<sup>23</sup>. Parmi les trois approches, l'approche basée sur les modèles fiabilistes est celle qui a la plus grande applicabilité. Elle est aussi la moins complexe à base de triangle.

---

<sup>21</sup> M. G. Schwabacher, Kai "A Survey of Artificial Intelligence for Prognostics" *Aaai fall symposium*, pp. 107-14, 2007.

<sup>22</sup> L. Vouigny, C. Hudon, and D. N. Nguyen, "Design of MIDA, a Web-Based Diagnostic Application for Hydroelectric Generators." pp. 166-171

<sup>23</sup> C. S. Byington, M. J. Roemer, and T. Galie, "Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [military aircraft]." pp. 6-2815-6-2824 vol.6

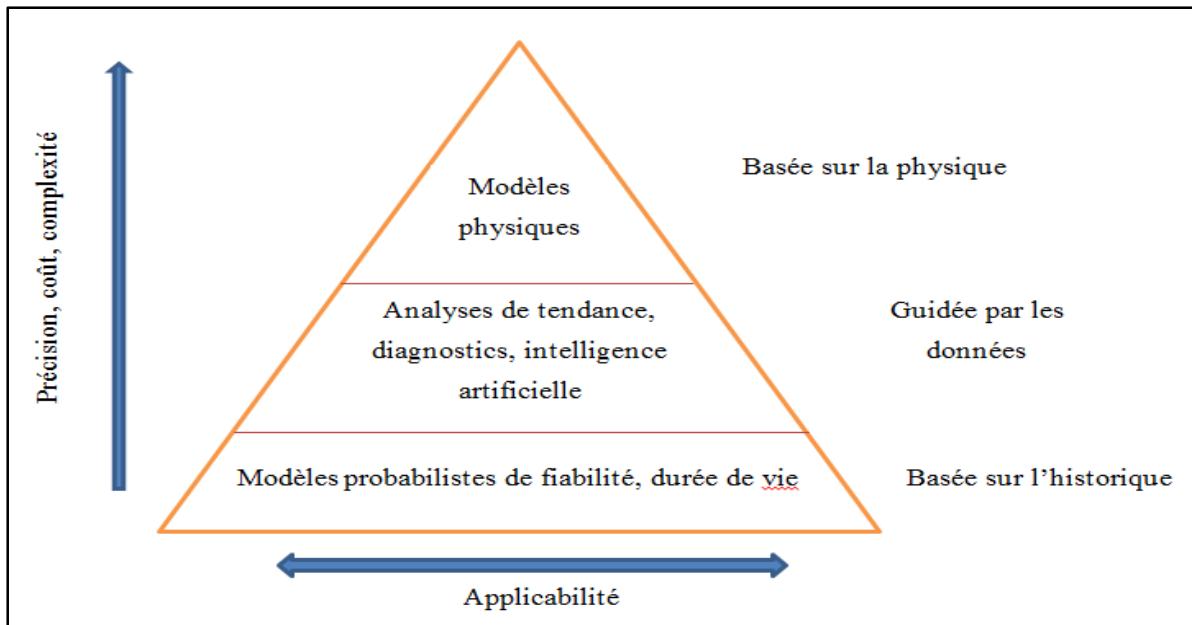


Figure 1.1 Classification des approches de pronostic  
Tirée de C.S Beyington, M.J. Roemer, et T.Galie (2003)

Les auteurs Hirschberg, Pulkkinen et al. dans leur article ont comparé cinq études portant sur l'analyse d'événements reliés à des défaillances de causes communes à partir des expériences internationales reliées soit à la conception, la fabrication, l'installation, les essais, l'entretien ou des événements externes [24]<sup>24</sup>.

L'auteur Reyraud a réalisé une étude détaillée des mécanismes de dégradation et très complète faisant appel aux techniques de l'Analyse des Modes de Défaillance de Cause à Effet (AMDEC) et des arborescences pour évaluer la probabilité de défaillance et le taux de défaillance, pour les phases d'attente, de démarrage et de fonctionnement [25]<sup>25</sup>.

Les auteurs Husseiny et al. dans leur article ont modélisé la fiabilité et la disponibilité à l'aide des chaînes de Markov, pour différentes configurations utilisées dans les centrales nucléaires à eau légère variant de un à cinq aussi [26]<sup>26</sup>. Ils démontrent l'intérêt de la modélisation de

<sup>24</sup> S. P. Hirschberg, U., "Common-Cause Failure Data: Experience from Diesel Generator Studies," *Nuclear safety* vol. 26, no. 3, 1985.

<sup>25</sup> Y. Reyraud, "De la fiabilité à la maintenance des groupes de secours dans les centrales nucléaires," *Entropie*, vol. 128, 1986L

<sup>26</sup> A. e. a. Husseiny, "Unavailability of Redundant Diesel Generators in Nuclear Power Plants.,," *Reliability Engineering*, vol. 3, 1982

l'indisponibilité par les chaînes de Markov pour un système réparable mais il en illustre en même temps la complexité d'analyse. Cependant, ils n'ont pas pris en compte les états physiques réels qui peuvent être identifiés en effectuant un mécanisme de défaillance et une analyse des symptômes ou une analyse de l'arbre causal.

Une approche bayésienne empirique pour évaluer les probabilités de défaillance à la sollicitation et en fonctionnement d'un ensemble de production. Outre ces études, on retrouve des méthodes stratégiques se basant sur la logique floue comme décrit par Ran et al. et Lee et al. sur les arbres de dégradation.

Pour ces motifs, nous pensons que la logique floue est ainsi recommandée non pas seulement pour contrer aux phénomènes électriques non-linéaires dans la machine hydro-électrique par l'intermédiaire de l'intelligence artificielle mais aussi dans la détermination des temps de transition entre les états physiques intermédiaires des mécanismes de défaillance des systèmes d'excitation.

### **1.3.3 Méthodes de détection de défauts dans les convertisseurs statiques**

Le convertisseur AC/DC est largement utilisé dans des applications telles que les moteurs à courants continus, les transmissions hautes tension courant continu, mais aussi dans les circuits dédiés aux systèmes d'excitation. Dans ce type d'applications, il est important de construire des systèmes fiables intégrant un diagnostic de pannes qui aiderait à localiser le défaut et à isoler immédiatement l'élément défectueux. De plus, des mesures correctives sont généralement amorcées après la panne du système afin d'améliorer sa fiabilité et sa maintenance à travers un arrêt d'urgence. Cet arrêt devrait être considéré et un lancement de traitement pour régler le défaut devrait être mis en place.

Il existe diverses catégories de défauts dans les circuits du redresseur à base de thyristors, parmi lesquels on cite les types: la défaillance de phase, la défaillance dans l'impulsion de gâchette, la défaillance dans le cas passant du thyristor, la défaillance du court-circuit à travers le thyristor et la défaillance à travers le courant continu de sortie du redresseur.

Du point de vue pratique, si un défaut de court-circuit est survenu dans la source de tension du système de conversion, il provoque l'arrêt immédiat. L'élément en défaillance est bloqué immédiatement et catégoriquement par des circuits de protection tels que des disjoncteurs et des fusibles qui accompagnent le circuit de commande. Sinon, le système est détruit de manière critique avec des dommages au niveau de la commutation et des dispositifs périphériques.

Au contraire, la défaillance en commutation ouverte du système, elle ne peut provoquer l'arrêt de fonctionnement mais elle causera la dégradation de ses performances. Dans ce cas, à l'entrée du convertisseur, se produisent des courants alternatifs non équilibrés y compris des harmoniques et des fluctuations au niveau de la tension continu du circuit. Ceci peut être une cause pour aboutir à des défauts secondaires. En effet, si une telle opération anormale persiste continuellement pour une longue durée, l'accumulation de la fatigue sous une instabilité d'opération peut causer le disfonctionnement des composants. En conséquence, il est fort probable que des défauts secondaires se produisent dans le convertisseur, dans la charge et dans le réseau. Par conséquent, la technique de diagnostic du convertisseur est nécessaire pour la surveillance et la détection d'un défaut.

Les techniques de diagnostic sont multiples et les domaines d'application sont très vastes. De nombreuses études ont déjà abouti à des solutions. Cette section présente les résultats de la recherche bibliographique effectuée à ce jour concernant les études ayant traits à la détection des défauts dans les convertisseurs. Le lecteur trouvera en référence une liste plus exhaustive de documents d'intérêt particulier dans le domaine de diagnostic.

Dans l'article<sup>27</sup>, un schéma de diagnostic de panne basé sur un microprocesseur pour un convertisseur triphasé entièrement commandé est présenté. Le système peut être utilisé avec un schéma de déclenchement basé sur un micro-processeur et une boucle de contrôle de courant de retour, qui atténue les effets des courts-circuits entre les bornes de charge. Ce système de micro-ordinateur basé sur le 8085A a bien fonctionné dans des conditions expérimentales [27]. Les auteurs offrent deux schémas d'algorithme pour une routine de

---

<sup>27</sup> S. Murty, G. K. Dubey, and R. M. K. Sinha, "Fault Diagnosis in Three-Phase Thyristor Converters Using Microprocessor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 6, pp. 1490-1497, 1984.

défaut de court-circuit et un deuxième pour une routine de défaut en circuit ouvert. Ils soutiennent que même s'ils ont testé leur schéma uniquement dans des convertisseurs triphasés, ils devraient également être applicables à d'autres types de convertisseurs à thyristors et pourraient également être utilisés pour d'autres fonctions telles que le contrôle de vitesse du moteur cc, le contrôle de courant et compensation pour conduction discontinue.

R. Jayabalan et B. Fahimi (2006) dans leur article ont surveillé et ont diagnostiqué les défauts d'un système multiconvertisseurs en cascade dans les véhicules électriques hybrides en utilisant des moments statistiques. Les auteurs ont constaté que les capteurs de courant et de tension existant dans le système étaient suffisants pour effectuer leur travail. Ils ont cherché à détecter, identifier et agir rapidement après avoir découvert un défaut afin d'éviter de se développer et de causer des dommages à l'ensemble du système. Leurs résultats issus d'une analyse d'un système matriciel du courant et de la tension, ont été validés pour assurer la détection de tout défaut possible encouru. Leur travail contribue également à assurer la sécurité et l'exploitation durable des véhicules en analysant et isolant les données de mode de défaillance obtenues à partir du système, puis en appliquant leurs résultats pour reconfigurer les systèmes de sécurité critiques.

Dans<sup>28</sup>, les auteurs de cet article diagnostiquent les défauts dans un convertisseur triphasé à modulation de largeur d'impulsion PWM courant alternatif / courant continu. Dans leur méthode, ils utilisent le vecteur d'espace PWM et la variation de son image avec l'orientation d'un vecteur courant de phase défectueux [28]. Le courant de phase est directement lié au cas de défaillance dans les contacts ouverts des six éléments de commutation. Ainsi, l'observation de l'angle de courant et de son changement par rapport aux courants triphasés mesurés, détecte directement l'interrupteur défectueux. Leur méthode de contrôle à tolérance de pannes suggérée permet une amélioration de la fiabilité du circuit. De plus, elle améliore la fiabilité et la performance du convertisseur utilisé en modifiant les modèles de commutation PWM lorsque les défauts sont détectés. Ils remarquent en fin du processus que la tension de liaison du côté courant continu est réduite tout en améliorant l'efficacité et la puissance du système.

---

<sup>28</sup> W. S. Im, J. M. Kim, D. C. Lee, and K. B. Lee, "Diagnosis and fault-tolerant control of 3-phase AC-DC PWM converter system." pp. 1328-1333

Les auteurs P. Sobanski et T. Orlowska (2017) dans leur article examinent la technique de diagnostic des défaillances se basant sur le courant de grille d'un redresseur triphasé à deux étages commandés en tension. La topologie étudie les transistors en circuits ouverts. Les hypothèses imposent deux valeurs minimales du défaut. Ces valeurs sont obtenues par prédiction actuelle basée sur la discrétisation suivant la méthode d'Euler de l'équation dynamique du redresseur. Leur étude s'épargne des tests expérimentaux qui sont non nécessaires car les valeurs peuvent être déterminées en analysant l'effet des défauts en circuit ouvert sur le courant de grille des transistors. Ainsi, la validité de leur algorithme couvre les défaillances engendrées durant les modes de fonctionnement du convertisseur. En somme, leur méthode se veut universelle et utilisable même dans les systèmes de contrôle de convertisseurs de ligne AC/ DC.

Les auteurs Ivanov et al.<sup>29</sup> dans l'article proposent une méthode de diagnostic qui compare les formes d'onde d'un variateur courant continu alimenté par un redresseur triphasé, fonctionnant dans des conditions normales, avec celles générées par leur modèle analytique. Au cas d'un défaut engendré sur le circuit, leur modèle de simulation Simulink est capable de détecter deux grandeurs physiques principales; les formes d'ondes de la tension de phase et la forme d'onde du courant [29]. Leurs résultats ont été stockés dans une base de données qui compile des informations relatives à l'identification de différents types de défauts ainsi que leurs formes d'onde correspondantes.

Dans<sup>30</sup>, les auteurs étudient la création d'une méthode basée sur un réseau de neurones artificiels pour diagnostiquer les défauts dans les convertisseurs redresseurs AC / DC des groupes motopropulseurs de véhicules électriques hybrides série (SHEV) [30]. Leurs investigations ont utilisé quatre niveaux différents de défauts de commutation et ont pris en compte des paramètres tels que les changements de taille de condensateur, la charge et les variations de vitesse. Ils détectent et diagnostiquent les défauts dans les convertisseurs AC /

---

<sup>29</sup> V. Ivanov, M. Brojboiu, S. Ivanov and F. Ocoleanu "Short circuits faults diagnosis for the rectifier based on the analytic model method" 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, 2016, pp.498-503

<sup>30</sup> S.S. Moosavi, A. Djerdir, Y. Ait-Amirat and D. Arab "Artificial neural network-based diagnosis in the AC-DC converter of the power supply of series hybrid electric vehicle" IET Electrical Systems in Transportation, volume 6, Issue 2, June 2016, p.96-106 b

DC à thyristor avec un angle d'amorçage nul. Ils découvrent également une nouvelle fréquence de modèle, donnée par  $f_{défaut} = \frac{(2k+1)f_f}{2}$  pour reconnaître les défauts dans ce type de convertisseurs.

## 1.4 Les jumeaux numériques

On parle de plus en plus des jumeaux numériques dans le monde de la technologie. Ils sont au cœur de la révolution industrielle qui est en train de se produire. Mais qu'est-ce qu'un jumeau numérique?

Chacun semble avoir sa propre définition. Dans ce paragraphe de revue bibliographique, on tente de mieux définir la notion de jumeau numérique dont on fait mention. Selon une étude de Gartner<sup>31</sup> et les prédictions de l'IDC<sup>32</sup>, les entreprises qui investissent dans la technologie du jumeau numérique auront 30% d'amélioration de leurs processus critiques. Et selon un article de Forbes<sup>33</sup>, toutes les indications semblent prédire que nous sommes sur le point d'assister à une explosion de la technologie du jumeau numérique [31] [32] [33].

En 2017, l'utilisation de cette technologie est encore très minoritaire, selon ABI Research et la technologie du jumeau numérique ‘digital twin’ va décoller affirme le cabinet de recherche. Il constate que si seulement 4% des entreprises manufacturières ont actuellement des jumeaux numériques en exploitation, 83% ont au moins commencé à enquêter sur cette technologie, alors que 29% prévoient de s'y essayer dans les 12 prochains mois. Il ajoute que 54% des systèmes de surveillance des infrastructures [34] seront alimentés par des jumeaux numériques d'ici 2026<sup>34</sup>.

---

<sup>31</sup> [www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017](http://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017)

<sup>32</sup> [www.idc.com/idcfuturescapes2016](http://www.idc.com/idcfuturescapes2016)

<sup>33</sup> <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/#5488440e2e2a>

<sup>34</sup> [www.zdnet.fr/actualites/industrie-vers-une-utilisation-massive-des-jumeaux-numeriques-en-passant-au-digital-39857684.htm](http://www.zdnet.fr/actualites/industrie-vers-une-utilisation-massive-des-jumeaux-numeriques-en-passant-au-digital-39857684.htm), 2017

#### **1.4.1 Objectif et pertinence des jumeaux numériques**

Pourquoi les jumeaux numériques? D'une manière générale, se sont toutes les opérations de maintenance qui peuvent le plus bénéficier de l'utilisation d'un jumeau numérique. "Aujourd'hui, que ce soit sur une voiture ou sur n'importe quelle machine, les interventions de maintenance sont déclenchées à partir de moyennes d'utilisation, mais demain nous nous baserons uniquement sur des informations réelles, ce qui permet d'être beaucoup plus efficace tout en réduisant les coûts", selon James Heppelmann [35] <sup>35</sup>. L'implantation de jumeaux numériques en entreprise recommande suivant Deloitte un déploiement en six étapes [36] <sup>36</sup>. Une fois adaptées au contexte de la production, du transport et de la distribution d'hydro-électricité, ces étapes sont :

- 1. Sélectionner les actifs** : La première étape consiste à sélectionner un ensemble d'actifs qui pourraient bénéficier de l'existence d'un jumeau numérique.
- 2. Concevoir et valider le jumeau numérique** : L'étape suivante consiste à identifier la configuration du jumeau numérique qui présente à la fois la plus grande valeur possible et les meilleures chances de succès.
- 3. Réaliser un projet pilote** : Envisager de passer rapidement à un projet pilote en utilisant des cycles itératifs et agiles pour accélérer l'apprentissage, gérer les risques de manière proactive et maximiser le rendement des investissements initiaux.
- 4. Industrialiser le processus** : Une fois la valeur démontrée, industrialiser le processus de développement et de déploiement de jumeaux numériques à l'aide d'outils, de techniques et de stratégies établis.
- 5. Étendre l'application** : Identifier les opportunités.
- 6. Surveiller et mesurer** : Identifier des paramètres qui permettent de mesurer objectivement la valeur fournie par le jumeau numérique.

---

<sup>35</sup> A. Mussomeli, A. Parott, B. Umbenhauer and L. Warsaw 'Digital twins Bringing the physical and digital' 2020

<sup>36</sup> "Industry 4.0 and the digital twin, Deloitte University Press, 2017," 2017

Dans notre étude, les jumeaux numériques peuvent créer de la valeur sous différentes formes à Hydro-Québec comme par exemple :

- prioriser les activités de maintenance et les investissements.
- assurer la sécurité des actifs et du personnel.
- augmenter la performance des actifs.
- optimiser l'exploitation du parc de production et des réseaux de transport et de distribution d'électricité.

#### **1.4.2 Revue des travaux scientifiques sur les jumeaux numériques**

Selon la définition de Gartner [37]<sup>37</sup>; un jumeau numérique est une représentation numérique d'une entité ou d'un système du monde réel. Dans le contexte de l'internet des objets (IoT), les jumeaux numériques sont liés à des objets du monde réel et offrent des informations sur l'état des contreparties, répondent aux changements, améliorent les opérations et ajoutent de la valeur.

Avec environ vingt-et-un milliard de capteurs et de terminaux connectés en 2020, des jumeaux numériques existeront pour des milliards de choses dans un avenir proche. Des économies potentielles de plusieurs milliards de dollars en exploitation, maintenance et performance optimisée des actifs sont sur la table.

À court terme, les jumeaux numériques offrent une aide à la gestion des actifs, mais offriront éventuellement de la valeur en termes d'efficacité opérationnelle et de compréhension de la façon dont les produits sont utilisés et comment ils peuvent être améliorés. En dehors de l'IoT, il existe un potentiel croissant de lier les jumeaux numériques à des entités qui ne sont pas simplement des ‘choses’.

---

<sup>37</sup> "<https://www.usine-digitale.fr/editorial/les-avions-auront-bientot-leur-jumeau-numerique.N336829>

Avec le temps, les représentations numériques de presque tous les aspects de notre monde seront connectés dynamiquement avec leurs homologues du monde réel. Les urbanistes, les spécialistes du marketing numérique, les professionnels de la santé et les planificateurs industriels bénéficieront tous de ce virage à long terme vers le monde jumeau numérique intégré.

Les applications du jumeau numérique dans la littérature varient entre le jumeau numérique de la NASA [38]<sup>38</sup>, l'exemple d'application du jumeau numérique de pompe d'Ansys [39]<sup>39</sup>, le 'Hybrid Twin de ESI' [40]<sup>40</sup> et le 'Augmented digital Twin d'Exosite'[41]<sup>41</sup>. Le bref paragraphe [42]<sup>42</sup> de ABB résume généralement les objectifs et les ambitions d'ABB en ce qui concerne sa nouvelle technologie de détection et de surveillance, transformateur TXpert un composant clé pour permettre une telle flexibilité, un composant qui améliorera également les performances du transformateur de distribution.

Cependant, les auteurs de cet article [43]<sup>43</sup> se penchent sur les énormes avantages de la création de jumeaux numériques de l'une des pompes à l'aide du logiciel de conception ANSYS Simplorer fonctionnant sur un ordinateur de bord HPE. Après que leur jumeau numérique a été déconnecté de la pompe physique, ils l'ont utilisé pour diagnostiquer des méthodes pour réparer la pompe. Le modèle de leur système prédit que l'ouverture de la soupape d'admission permettrait de réparer la pompe. Ils ont ensuite validé ce correctif potentiel dans une deuxième simulation 3D effectuée sur le modèle de système hors ligne avec la vanne ouverte. Aucune bulle de vapeur n'a été détectée, le repère a été appliqué et le fonctionnement de la pompe physique est revenu à la normale.

Le concept de jumeau numérique 'digital twin' a été introduit par la NASA Figure 1.2, au début des années 2000. Selon la définition donnée dans une publication récente de la NASA,

<sup>38</sup> S. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles," in Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin, 2017

<sup>39</sup> C. MacDonald, M. Davoudabadi, "Creating a digital twin for a pump, ANSYS advantage," vol. 1, 2017, 2017

<sup>40</sup> "ESI, Supporting the industry 4.0 transformation – ESI calls for a new paradigm: The Hybrid TwinTM," *The virtual prototyping newsletter*, vol. 67, no. September 2017, 2017

<sup>41</sup> M. A. R. Kucera, M. Benson, , "The augmented digital twin – Combining physical and virtual data to unlock the value of IoT," <http://info.exosite.com/augmented-digital-twin>, 2017

<sup>42</sup> "<http://new.abb.com/news/detail/1097/worlds-first-digital-distribution-transformer>."

<sup>43</sup> A. ADVANTAGE, "Creating a digital twin for a pump ", 2017

leur jumeau numérique est “an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or a system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc. to mirror the life of its corresponding flying twin.” [44] <sup>44</sup>.

Dans leur article, les auteurs Glaessgen et Stargel (2017) expliquent que les futures générations de véhicules de la NASA et de l'US Air Force nécessiteront une masse plus légère tout en étant soumis à des charges plus élevées et à des conditions d'opération plus extrêmes sur des périodes plus longues que la génération actuelle.

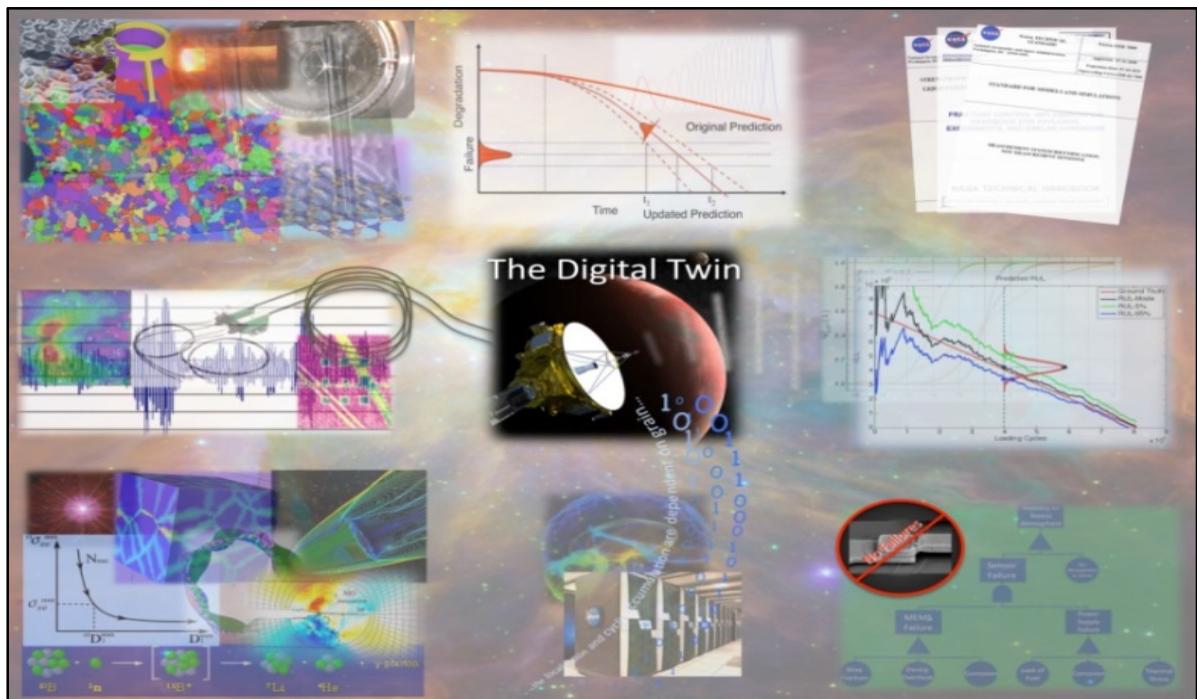


Figure 1.2 Le modèle de ‘digital twin’ de la NASA  
Tirée de S. Stargel (2017)

<sup>44</sup> S. Stargel, “The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles,” in Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin, 2017

Dans<sup>45</sup> des détails sur de nombreuses technologies critiques pour le jumeau numérique sont actuellement développée par la NASA [45]: modélisation multi-échelle et multi-physique, analyse de durée de vie et calcul haute performance. Cependant, le concept est ambitieux et atteindra sa pleine maturité après plusieurs décennies, donc une série d'étapes intermédiaires sera nécessaire.

Pour remédier aux lacunes de l'approche conventionnelle, un changement de paradigme fondamental est nécessaire. Ce changement de paradigme, le jumeau numérique, intégrera la simulation ultra-haute fidélité avec la surveillance embarquée du véhicule, son historique de maintenance et toutes les données disponibles pour refléter la vie de son jumeau réel et permettra des niveaux de sécurité et de fiabilité sans précédent. Le jumeau numérique de la NASA est représenté à la Figure 1.2, pourra également prédire la réponse du système aux événements critiques de sécurité et anticiper les problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques en comparant les réponses prédictes et réelles.

## 1.5 Conclusion

Ce chapitre et cette revue bibliographique a permis de revoir des références discutées et montrant l'utilité de cette technique de simulation éléments-finis:

- dans l'étude de l'état de la machine connectée à une charge équilibrée et une charge déséquilibrée par observation des harmoniques supplémentaires du côté rotor.
- dans la détection des défauts de court-circuit dans la machine suivant une interface de glissement au niveau de l'entrefer.
- dans la conception de la machine synchrone.
- dans la variation dans les paramètres de la machine comme les propriétés des matériaux magnétiques en regardant les pertes générées par une validation avec les tests expérimentaux.

---

<sup>45</sup> S. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles," in Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin, 2017

Ainsi, la méthode de la modélisation par éléments-finis fait souvent appel à l'étude précise de la machine afin de visualiser en profondeur ses performances. En contrepartie, l'exposition de l'état de l'art au niveau des systèmes d'excitation montre la nécessité d'une étude approfondie de l'alternateur hydro-électrique. Pour cette raison, dans le but de mettre en évidence l'importance de cette partie dans la production de l'électricité, notre modélisation par éléments-finis étudiera en détail les modes de fonctionnement de La Grande 4 en sur-excitation et en sous-excitation. De suite, notre recherche construit un jumeau numérique qui contient des informations électriques par observation des grandeurs électromagnétiques aussi bien que des informations mécaniques sur le diagnostic par mécanismes de défaillance des différents types circuit d'excitation.



## **CHAPITRE 2**

### **MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS DE L'ALTERNATEUR HYDRO-ÉLECTRIQUE**

#### **2.1 Introduction**

L'évolution de la méthode des éléments finis est liée aux développements en ingénierie et en informatique. Son application dans divers domaines, en particulier dans les secteurs du nucléaire, de l'aéronautique et du transport, témoigne de la grande précision de la méthode, ainsi que de sa capacité à modéliser des problèmes complexes et multiphysique en hydroélectricité. Généralement, en électromagnétisme, la méthode des éléments finis est associée à des méthodes résiduelles. Dans le premier cas, la procédure numérique est établie en utilisant une fonction qui doit être minimisée et particulièrement définie pour chaque problème. Il est à noter que pour les problèmes deux dimensions classiques, le fonctionnel est nécessaire, ce qui peut être une tâche difficile dans certains cas. On a adopté la méthode par éléments finis pour résoudre le champ électrique et électromagnétique statique. Dans cette vision, le jumeau numérique a été créé de l'alternateur hydro-électrique La Grande 4.

#### **2.2 Développement théorique des équations de Maxwell**

Le principe fondamental de la méthode des éléments-finis est de subdiviser la géométrie de calcul en plusieurs petits éléments non-intrinsèques. On retrouve d'autres méthodes, comme la méthode de Galerkin qui est une forme particulière des méthodes résiduelles et elle est largement utilisée dans l'électromagnétisme car elle fournit des résultats précis. Par contre, l'application des méthodes numériques basées sur les équations de Maxwell, demeure la plus performante dans la simulation complexe de cet équipement énorme.

Les équations sont constituées dans le but de relier le principe de l'électricité au principe du magnétisme à l'aide d'une théorie unifiée du champ, dont les détails analytiques et le développement différentiel théorique ci-dessous.

L'équation (2.1) de Maxwell-Faraday relie les variations temporelles du champ magnétique aux variations spatiales du champ électrique :

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Du point de vue expérimental, la division de l'aimant magnétique en deux aimants donne naissance à deux autres aimants aboutissant ainsi à démontrer l'absence d'un monopole magnétique.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

L'équation (2.2) de Maxwell-Gauss qui exprime une divergence nulle du champ magnétique. Par l'introduction de la densité D du flux électrique, Maxwell introduit l'équation (2.3) pour évoluer le théorème d'Ampère en liant cette dernière à la densité de courant J et à l'intensité du champ magnétique H par :

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.3)$$

Dans le cas de notre étude, la distribution du champ électromagnétique est stationnaire ou quasi-stationnaire par conséquent la variation  $\frac{\partial D}{\partial t}$  de la densité du courant est négligeable. D'autre part, la loi de Gauss définit à l'échelle macroscopique une divergence de la densité du flux électrique égale à  $\rho$  la densité de charge électrique, impliquant les équations (2.4) et (2.5) :

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = J \quad (2.5)$$

La résolution transitoire en 2D de l'ensemble des équations, nécessite l'utilisation des solveurs tels que le solveur statique de Maxwell, le solveur du courant de Foucault. Dans le but de simuler le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, on choisit le solveur transitoire.

$\vec{A}$  étant le vecteur potentiel magnétique défini par (2.6), substitué avec le potentiel scalaire électrique  $V$  pour définir le champ électrique par l'équation (2.7) :

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.6)$$

$$\vec{E} = -(\nabla V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) \quad (2.7)$$

Le potentiel scalaire électrique, présente deux valeurs élevée-faible aux deux extrémités de la région conductrice et une valeur nulle dans les régions non conductrices. Pour cela, il est plus raisonnable d'augmenter la résolution dans des régions d'intérêt spécial de l'alternateur hydro-électrique, où le champ magnétique varie avec le temps.

Dans notre étude, l'entrefer constitue l'espace d'intérêt spécial pour observer le flux magnétique. Ainsi, en combinant les notions précédentes, la densité du flux magnétique  $B$  et la densité de courant  $J$  se calculent dans l'équation:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = -\sigma \left( \nabla V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \nabla \times \vec{H} = \nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla \times \vec{A}) \quad (2.8)$$

L'étape suivante est de faire le choix des conditions aux limites et de choisir une fonction d'interpolation pour approximer la fonction inconnue entre chaque élément. De même, on impose des contraintes sur les bordures du système à analyser. Si les éléments sont assez petits, une fonction polynomiale de forme à variables indépendantes d'ordre un ou deux, est d'habitude suffisante pour créer l'élément fini comme interprété par Bastos.

Ces deux parties sont importantes pour assurer la discréétisation du domaine et pour pouvoir résoudre au complet le problème du champ. La condition d'homogénéité Gauge-Coulomb sur la circonference interne et externe de la machine, est équivalente à considérer la perméabilité magnétique d'un matériel extérieur comme étant nulle, donc comme étant un isolateur magnétique parfait. Donc, le champ magnétique se disperse dans cette barrière et en posant  $H_c$  comme étant le champ magnétique à l'hystérésis on obtient l'équation (2.10):

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \nabla \times H_c - \sigma \left( \nabla V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) + \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) \quad (2.10)$$

Cependant, dans les problèmes magnétiques en deux dimensions, le courant circule tout au long d'un axe et la densité de flux reste dans le plan perpendiculaire à cet axe (2.11):

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J} \quad (2.11)$$

### 2.3 Conception électromagnétique de l'alternateur hydro-électrique

La conception de la machine proposée a tenu compte des caractéristiques électriques et mécaniques, Tableau 2.1. Le module de conception dans le logiciel utilisé, calcule analytiquement les performances de la machine, prend les décisions de dimensionnement initiales et effectue des centaines de scénarios de simulation en quelques secondes. Outre les calculs classiques, l'interface génère automatiquement la géométrie, la configuration cinétique et mécanique, les propriétés des matériaux, en plus de faire l'assignation des conditions aux limites et des conditions d'excitation pour la simulation détaillée de l'alternateur hydro-électrique.

À partir de ses paramètres et les plans du constructeur pour le dessin du stator et du rotor, il est primordial d'effectuer un choix des critères suivant: pas de temps, maillage convenable,

calcul du circuit externe associé aux barres d'amortissements, aux pôles rotoriques, aux armatures de phases ainsi que les conditions de charge couplée: à vide, nominale et de défaut.

Dans la détermination du pas de calcul, il faut assurer un compromis entre la rapidité et la précision de la solution sinon un choix arbitraire ne converge pas. La répartition de la densité du flux magnétique et des courants statoriques est considérée identique dans chaque plan le long de toute la longueur de la machine.

Tableau 2.1 Caractéristiques électriques et mécaniques de La Grande 4

<b>Fréquence</b>	60 Hz
<b>Vitesse de rotation</b>	128.6 tr/min
<b>Puissance</b>	310 MVA
<b>Tension de ligne</b>	13 800 V
<b>Courant de ligne</b>	12 929 A
<b>Facteur de puissance</b>	0.95
<b>Température maximum d'enroulement rotor-stator</b>	105 degrés Celsius

Cette hypothèse permet de réduire le temps de calcul d'une façon remarquable et mène à un développement du résultat vers le plan z en trois dimensions. À une fréquence d'échantillonnage petite et constante où l'échantillon constitut l'élément de maillage, l'équation (2.12) s'applique en correspondance:

$$\Delta T = \frac{60}{N_{\text{encoches}} \omega_{\text{rotation}} N_{\text{échantillons}}} \quad (2.12)$$

Pour construire le circuit externe, on tire les valeurs des composantes à partir des données du constructeur, sinon en se basant sur les formules:

$$Z_{\text{charge}} = \frac{V_{LL}/\sqrt{3}}{I_\emptyset} = \frac{V_\emptyset}{I_\emptyset} \quad (2.13)$$

$$R_C = Z_{\text{charge}} \cos \varphi \quad (2.14)$$

$$X_C = Z_{\text{charge}} \sin \varphi \quad (2.15)$$

Le circuit externe détaillé dans le chapitre 3 de ce mémoire à la Figure 3.7, représente ainsi les enroulements de la source de tension triphasée en liaison avec l'excitation et les barres d'amortissement des pôles rotoriques. Mécaniquement, les fins d'enroulements sont des anneaux de cuivre qui relient l'extrémité des barres d'amortissements qu'on représente dans le circuit externe de la Figure 3.7 du chapitre 3.

Les alternateurs hydro-électriques sont des machines fractionnelles dont les conditions de symétrie magnétiques sont déterminées par le nombre d'encoche/ nombre de pôles/nombre de phases:

$$\frac{408}{(56 * 3)} = 2 + \frac{3}{7} \quad (2.16)$$

Le maillage est une opération de décomposition des surfaces continues pour permettre des calculs sur les petites surfaces et aux points d'intersection. C'est une opération essentielle avant d'obtenir des résultats. Par contre, plus le nombre d'éléments finis s'élève dans une surface, le temps et la complexité des calculs augmenteront proportionnellement. Donc, la stratégie de maillage doit s'appliquer aux endroits de plus grande importance et utilité pour observer les grandeurs physiques et tirer les cartes de champ.

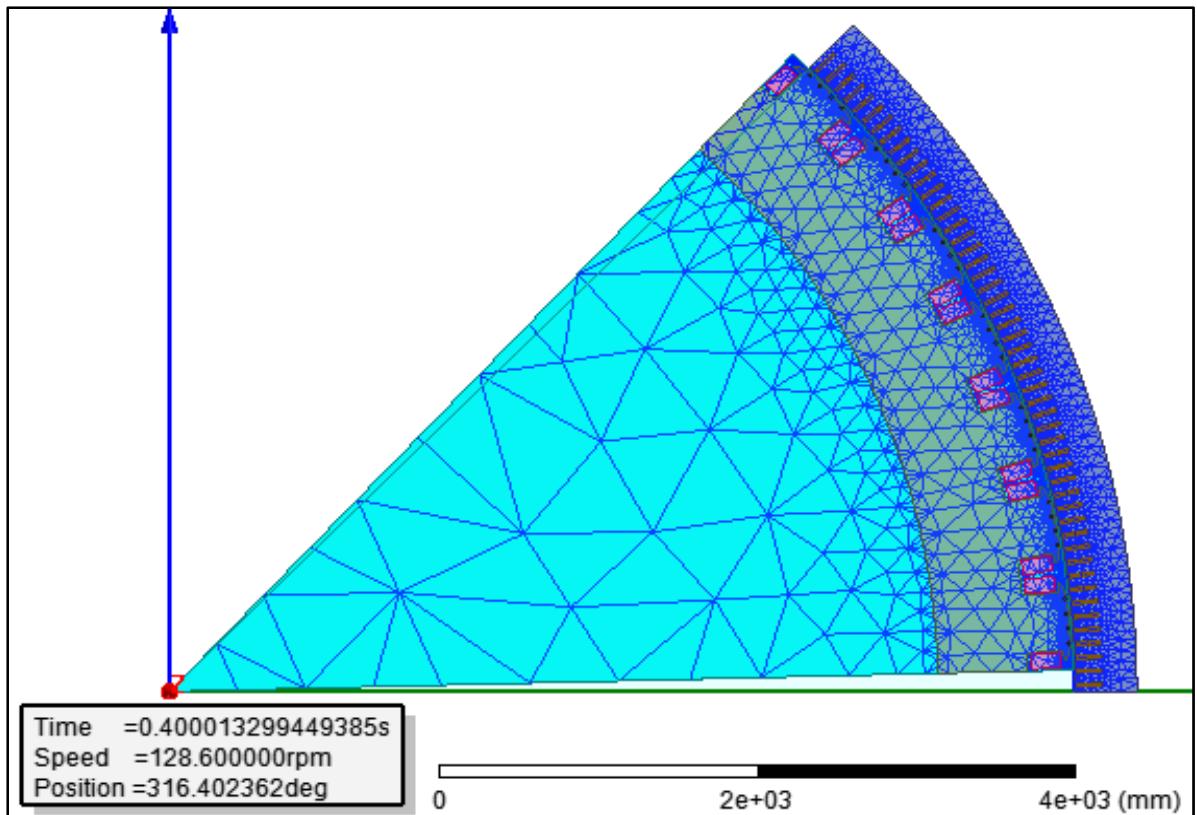


Figure 2.1 Symétrie magnétique fraction du modèle de La Grande 4

L'entrefer a une influence directe sur la force magnétomotrice du circuit magnétique. À l'inverse des grandeurs physiques, l'étude du flux magnétique dans l'entrefer est la plus sensible à l'état de la charge et permet de diagnostiquer les défaillances provenant du système d'excitation et endommageant l'alternateur hydro-électrique. Le principe de Carter qui considère en moyenne l'entrefer comme étant plus long que sa mesure physique, l'entrefer équivalent sera calculé manuellement en introduisant le facteur:

$$k_{C,\text{total}} = k_{C,\text{stator}} k_{C,\text{rotor}} \approx k_{C,\text{rotor}}.$$

En négligeant les effets des encoches, l'induction magnétique  $B$  dans l'entrefer est liée à la force magnétomotrice mmf qui contient des harmoniques impairs, imposées par les caractéristiques de construction, équation (2.17).

$$B = mmf \times \lambda \quad (2.17)$$

Dans la conception de La Grande 4, la géométrie de symétrie magnétique simulée contient sept pôles tiré du résultat de l'équation (2.16). Avec cette fraction Figure 2.1, chaque circuit d'amortissement créé contient quatre branches de barres d'amortissement.

## 2.4 Tests de validation

La validation du modèle conçu, vise de le rendre conforme aux normes IEEE 115 en lançant les tests à vide et le test en court-circuit à différents courants d'excitation. Dans cette partie le maillage n'est pas fin vu qu'on n'observe pas les courants dans les barres d'amortissement et les résultats sont tirés en régime permanent. On suppose l'alternateur hydro-électrique avec ses effets non-linéaires.

### 2.4.1 Test à vide conforme à la norme IEEE 115

L'essai à vide est désigné par un circuit externe distinct. Les points de fonctionnement varient selon le courant d'excitation dans l'intervalle [0 A; 2 250A].

Les résultats obtenus de la valeur efficace de la tension induite en kV dans la Figure 2.2. La carte des champs magnétiques considérée pour le point de fonctionnement  $I_f = 1000$  A représente l'absence de la réaction de l'induit et illustre des lignes de flux perpendiculaires sur les pôles de l'alternateur hydro-électrique. Les simulations traduisent un flux proportionnel à la tension induite à vide visualisée.

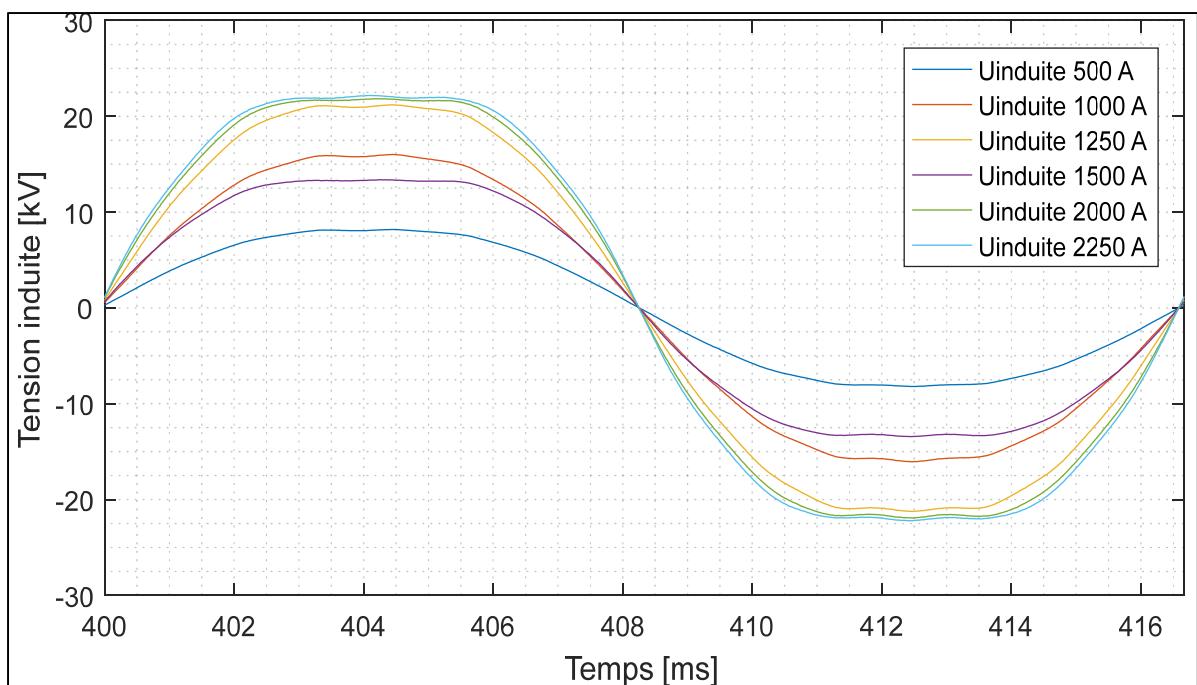


Figure 2.2 Valeur efficace des tensions induites de l'essai à vide

À ce moment, j'ai visé à étudier l'allure en traçant la Figure 2.3 à vide de La Grande 4 par comparaison aux résultats expérimentaux mesurés lors de la réception de l'alternateur hydro-électrique en centrale et conformément à la norme IEEE 115 [46]<sup>46</sup>.

La courbe présente une déviation dans l'intervalle [1250 A; 2250 A]. L'erreur varie d'un minimum de 0.67% à un maximum de 5% au point d'excitation 2000 A. Cet écart est acceptable suivant le catalogue du constructeur qui accepte une erreur maximale de 5% de la tension induite.

---

<sup>46</sup> “IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Part IAcceptance and Performance Testing Part II Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis,” *IEEE Std 115-2009 (Revision of IEEE Std 115-1995)*, pp. 1-219, 2010

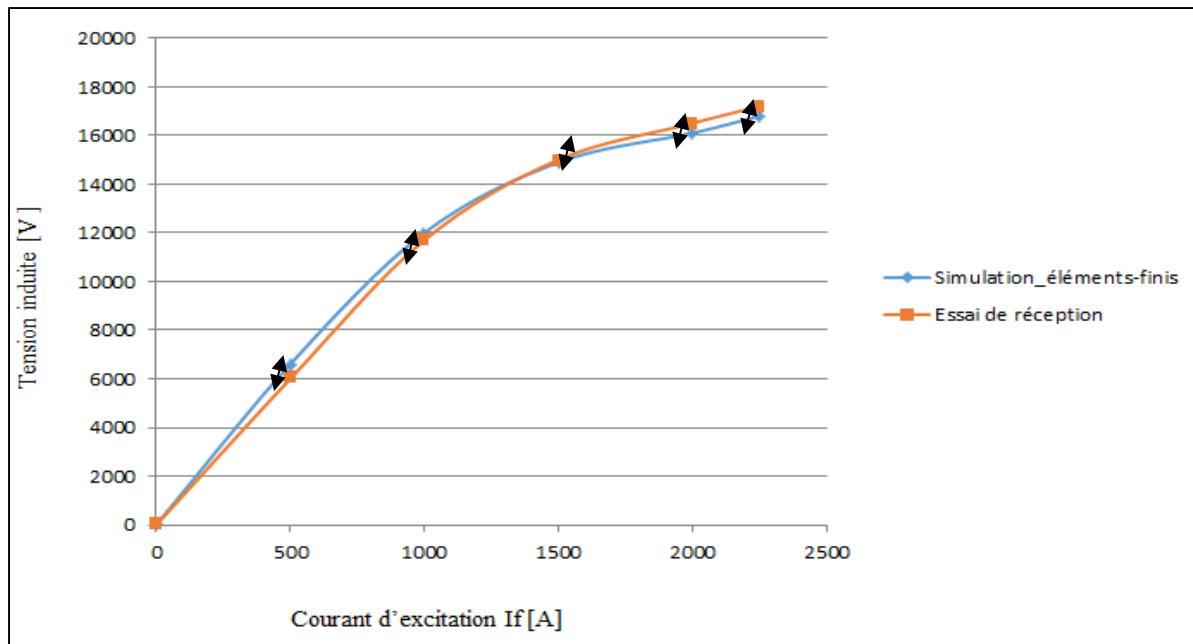


Figure 2.3 Tension induite en fonction du courant d'excitation de l'essai à vide et de réception

#### 2.4.2 Test en court-circuit permanent conforme à la norme IEEE 115

La même démarche a été adoptée pour mener l'essai en court-circuit de La Grande 4 où le circuit externe représente une impédance nulle utile pour cet essai dans l'intervalle [0 A; 1750 A].

Dans ce cas, la réaction d'induit s'exprime par une déviation prononcée sur les pôles rotoriques et autour des barres d'amortissement.

Par la suite et en comparaison avec le même résultat obtenu dans l'essai à vide, on remarque la différence dans la forme spécialement au niveau des dents côté stator où l'observation des boucles est claire dans le cas d'un court-circuit permanent, Figure 2.7.

Ces résultats montrent dans Figure 2.4, que La Grande 4 limite la simulation à la valeur maximale des mesures vu que le courant de court-circuit dans ce cas présente une valeur de 16 000 A supérieure à la valeur du courant nominale 12 970 A.

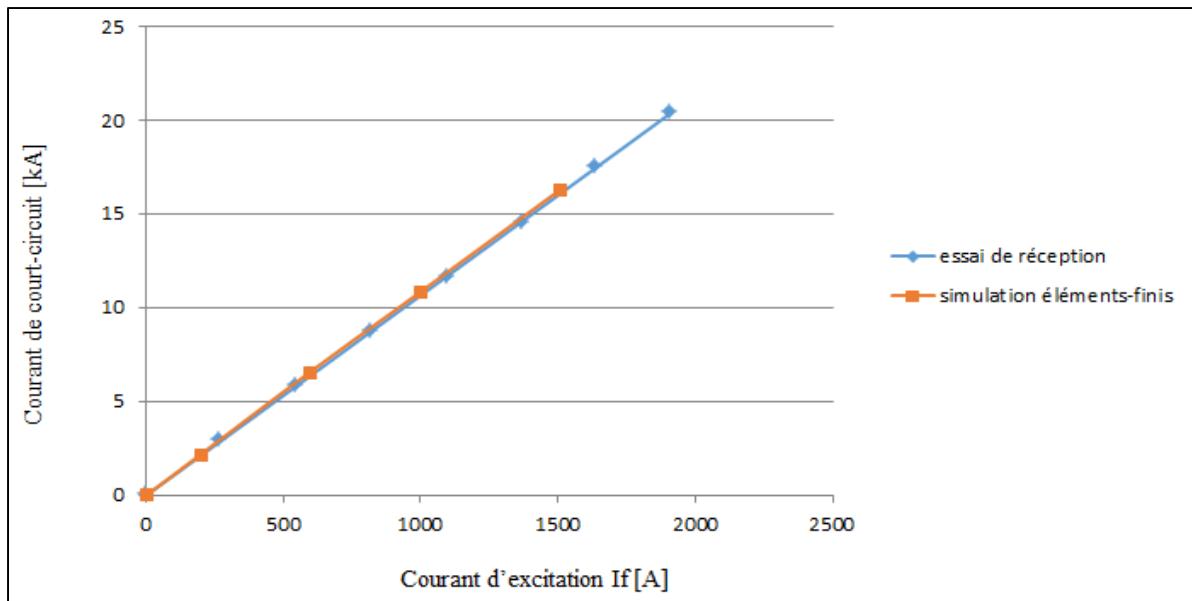


Figure 2.4 Droite de l'essai de court-circuit permanent au moment de validation de l'alternateur hydro-électrique

Les deux droites se confondent, les simulations en court-circuit se corrèlent avec les essais effectués en centrale lors de la réception et de l'essayage.

En conséquence des deux tests effectués, le modèle est dit ‘valide’ et conforme à la norme IEEE 115.

## 2.5 Essai à vide

Après avoir validé le modèle électromagnétique, la première simulation sert à analyser l'alternateur hydro-électrique à vide pour un courant d'excitation  $I_f = 1206 \text{ A}$ .

Par contre, tout phénomène qui se passe au stator influe sur le rotor et inversement. L'allure dans le résultat de la tension induite statorique est alternative dans les trois phases A, B et C, Figure 2-5. L'écart calculé entre la valeur crête simulée et la valeur crête théorique est acceptable de 3.62 %, inférieur à la limite 5 %.

$$U_{crête_{théorique}} = 13800 \times \sqrt{\frac{2}{3}} = 11\ 267.65\ V = 11.268\ kV \quad (2.18)$$

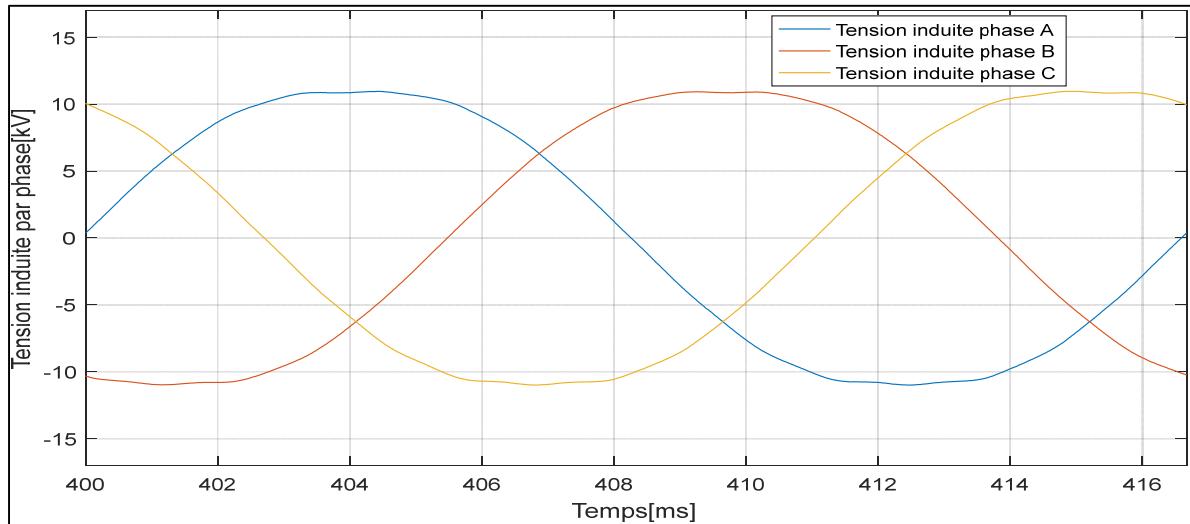


Figure 2.5 Courbes des tensions induites triphasées à vide de La Grande 4

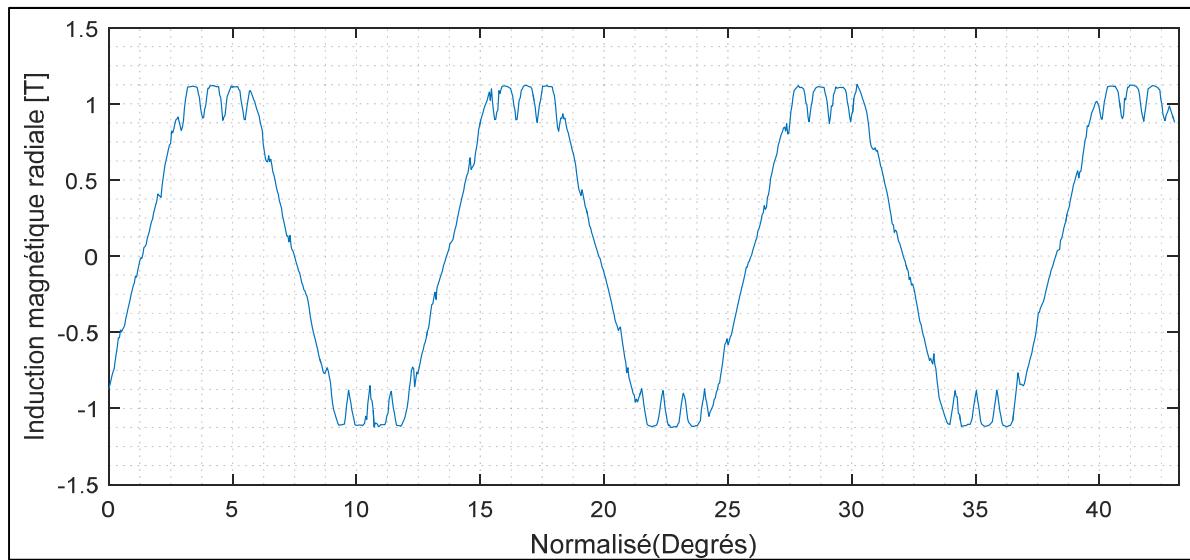


Figure 2.6 Induction magnétique spatiale à vide en fonction des degrés normalisés, pour  $t=0.63\text{s}$

L’induction radiale ne présente pas une sinusoïde parfaite. Son alternance illustre dans la Figure 2.6 la polarité Nord-Sud des pôles de l’alternateur hydro-électrique avec quatre creux équivalents correspondant au nombre d’encoche que réfléchi devant la face polaire.

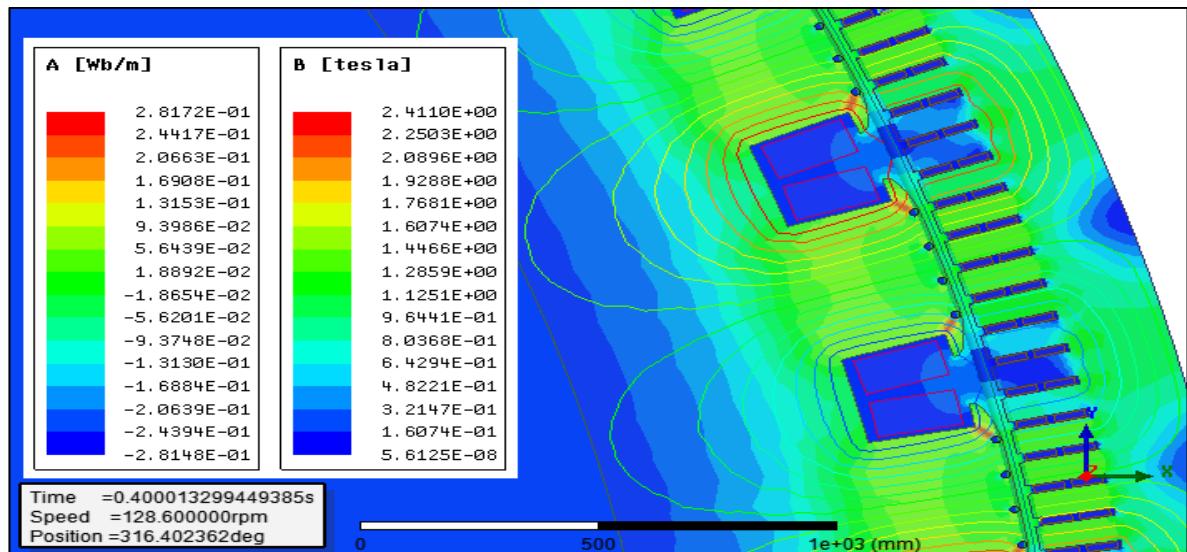


Figure 2.7 Résultat de la carte des champs à vide de La Grande 4

Donc, le flux magnétique radial situé sur l’arc de l’entrefer constitue une information supplémentaire sur le phénomène électromagnétique. La présence de la force de l’inducteur et l’absence de la force de l’induit se traduit par des lignes de champs espacés uniformes du côté rotor. Du côté induction magnétique, l’induction crête est de 1.32 T donnant une densité du flux uniforme au niveau des dents du stator, Figure 2.7.

## 2.6 Conclusion

Dans cette recherche, La Grande 4 un énorme alternateur hydro-électrique est modélisé par éléments finis pour construire son jumeau numérique. L’étude tient compte de plusieurs critères qui contribuent à son originalité et sa validation.

Les courants statoriques produisent une onde de flux rotatif alors que les courants rotoriques contribuent à une onde de flux stationnaires par rapport au rotor.

En synchronisme, un couple constant est produit. La concordance entre les résultats expérimentaux et le modèle simulé a conduit à la validation suivant la norme IEEE 115. L'essai en circuit ouvert, l'essai à vide ont été mené où la tension aux bornes de la machine est mesurée en fonction du courant d'excitation. Tandis que le test de court-circuit représenté en fonction du courant de champ.

De ce fait, les résultats observés et valides expérimentalement au niveau des champs magnétiques, de la représentation spatiale de l'induction magnétique à quatre creux, de la courbe d'essai à vide, de la droite de l'essai de court-circuit et des tensions triphasées alternatives induites, constituent une valeur ajoutée dans la modélisation par éléments-finis des machines hydro-électriques surtout au niveau du maillage et du modèle réduit avec succès par symétrie magnétique.

## CHAPITRE 3

### Systèmes d'excitation des alternateurs hydro-électriques

#### **3.1 Les systèmes d'excitation pour la génératrice synchrone**

On classe trois catégories de systèmes d'excitation pour générer la tension d'excitation de l'alternateur hydro-électrique et on cite :

##### **la catégorie rotative:**

- excitation de type machine à courant continu MCC.
- excitation de type machine à courant alternatif MAC.

##### **la catégorie statique:**

- excitation de type statique.

Le circuit de commande, le circuit de contrôle, le circuit de surveillance, le circuit de support de transmission sont communs aux trois catégories.

##### **3.1.1 Catégorie rotative; excitation de type machine à courant continu DC**

L'excitation à courant continu est la plus ancienne et elle utilise des machines à courant continu MCC pour produire la tension continue pour l'inducteur de la machine synchrone. La tension d'excitation alternative produite est ensuite redressée par un redresseur pour alimenter l'alternateur hydro-électrique à travers une connexion mécanique de balais et collecteurs, Figure 3.1.

La MCC est auto-excitée ou bien, à excitation séparée à l'aide d'une machine électrique extérieure. De ce fait, on nomme la MCC par ‘excitatrice principale’ et la génératrice à aimant permanent une ‘excitatrice pilote’.

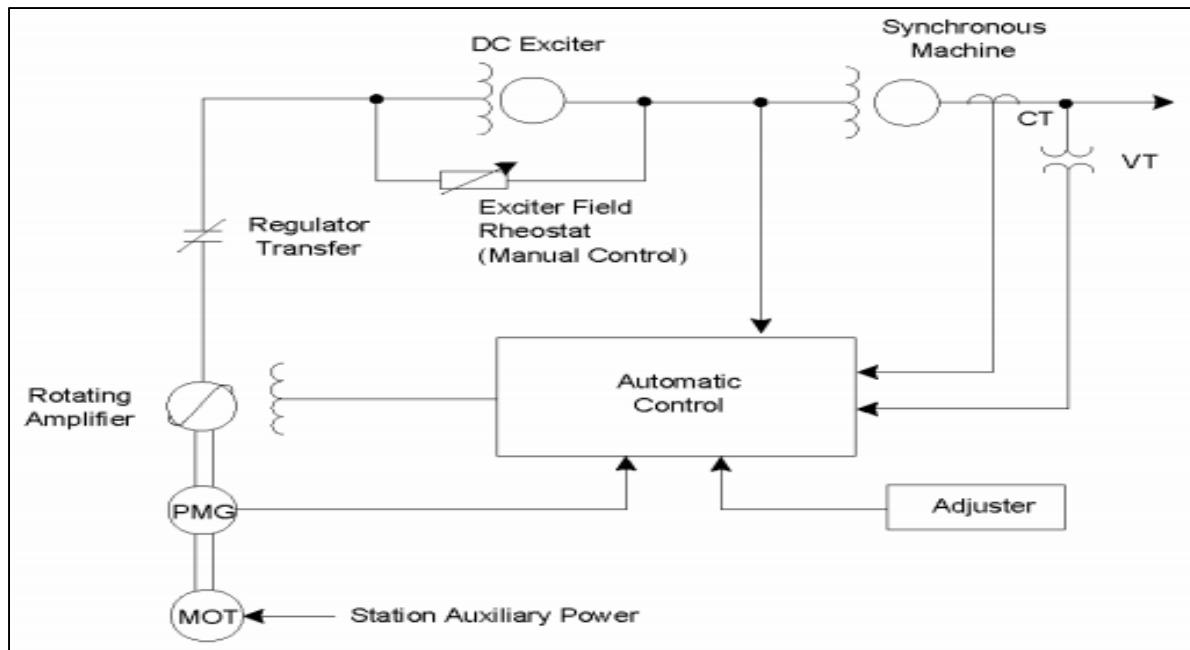


Figure 3.1 Modèle suivant la norme IEEE 421 d'une excitation machine à courant continu  
Tirée de IEEE Draft Standard Definitions (2006, 2007)

### 3.1.2 Catégorie rotative; excitation de type machine à courant alternatif AC (Alternative Current)

Le type d'excitation AC est très robuste, il est constitué de l'excitatrice principale qui est une machine électrique à courant alternatif. Cette dernière est nommée 'brushless'<sup>47 48 49 50 51</sup> sans balais collecteurs. C'est un alternateur inversé dont le circuit d'excitation placé au stator est alimenté par une génératrice pilote qui ne possède pas des bagues collectrices d'où sa nomenclature [47] [48] [49] [50] [51].

<sup>47</sup> E. ABB, "Brushless Excitation Systems Upgrade," ed: ABB, 2011

<sup>48</sup> W. Na, "A feedforward controller for a brushless excitation system during the diode open circuit fault operation," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 2011, pp. 1-4

<sup>49</sup> S. Rosado, X. Ma, G. Francis, F. Wang, and D. Boroyevich, "Model-Based Digital Generator Control Unit for a Variable Frequency Synchronous Generator With Brushless Exciter," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 42-52, 2008

<sup>50</sup> M. G. McArdle and D. J. Morrow, "Noninvasive detection of brushless exciter rotating diode failure," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, pp. 378-383, 2004.

<sup>51</sup> A. Griffo, R. Wrobel, P. H. Mellor, and J. M. Yon, "Design and Characterization of a Three-Phase Brushless Exciter for Aircraft Starter/Generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 2106-2115, 2013

L'inducteur de la génératrice pilote est constitué d'aimants permanant en rotation alors que l'induit, placé au stator est bobiné en triphasé, Figure 3.2. La tension de sortie statorique est redressée à l'aide d'un pont à thyristors. La tension triphasée produite au rotor de la 'brushless' est appliquée à un pont de diodes tournantes. Le tout, est un montage mécanique sur l'arbre du groupe de production.

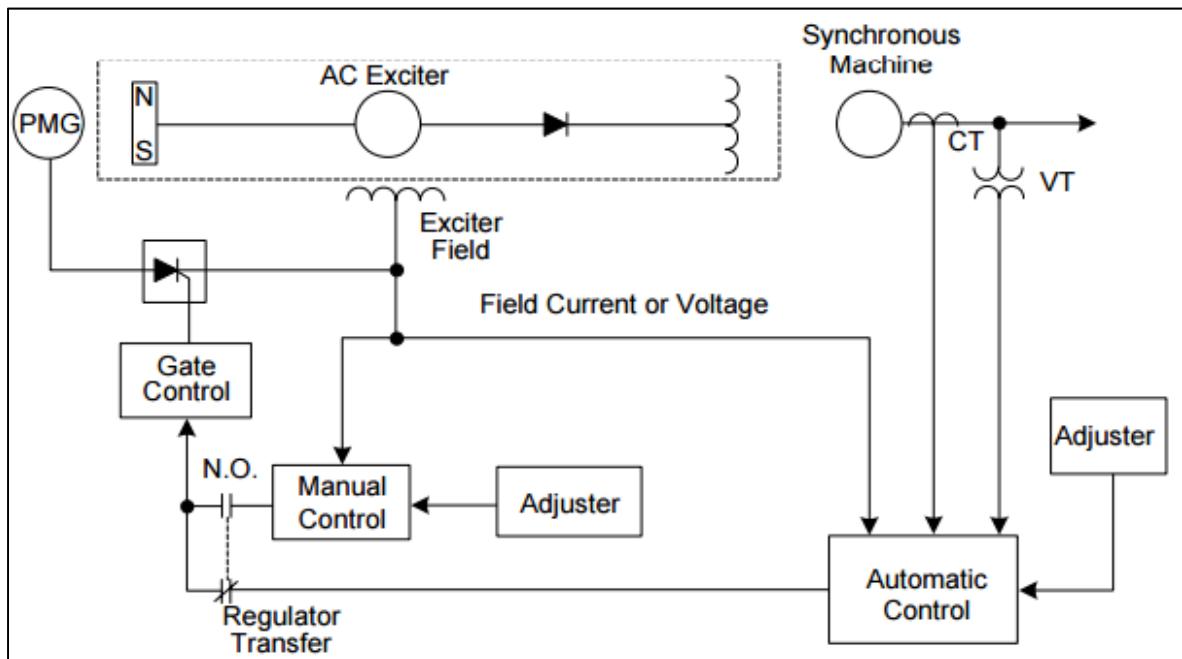


Figure 3.2 Modèle suivant la norme IEEE 421 d'une excitation machine à courant alternatif ‘brushless’

Tirée de IEEE Draft Standard Definitions (2006, 2007)

### 3.1.3 Catégorie statique; excitation de type statique ST (Static)

Le système d'excitation statique est le système d'excitation le plus récemment installé dans le parc de production d'Hydro-Québec. Suivant les statistiques du partenaire industriel Hydro-Québec en 2011<sup>52</sup>, cent quatre-vingt-cinq unités réparties sur soixante-deux centrales donnant une capacité de production de 31 306 MVA [52]. Ils remplacent les systèmes d'excitation rotatifs anciens et

<sup>52</sup> I. R. E. Q. H.-Q. Production, "Pérennité des systèmes d'excitation, Centrales hydroélectriques de la VPEEP," I.R.E.Q.2011.

offrent de meilleures performances plus précisément le temps de réponse rapide et la faible maintenance.

Les systèmes de sources d'excitation statique sont répandus aussi pour les nouvelles installations d'alternateurs hydro-électriques et nécessitent une bague collectrice pour fournir de l'énergie à l'enroulement inducteur. Le type d'excitation statique est complètement stationnaire sans aucune partie rotative. Il est constitué des composants suivants : un convertisseur redresseur trois phases, un transformateur abaisseur de tension, système de contrôle numérique à microprocesseurs<sup>53</sup> <sup>54</sup> <sup>55</sup> voir Figure 3.3 [53] [54] [55]. Cependant, il existe trois familles d'excitation statique :

- avec redresseur commandé à source de tension.
- avec redresseur commandé à source combinée.
- avec redresseur non commandé à source combinée.

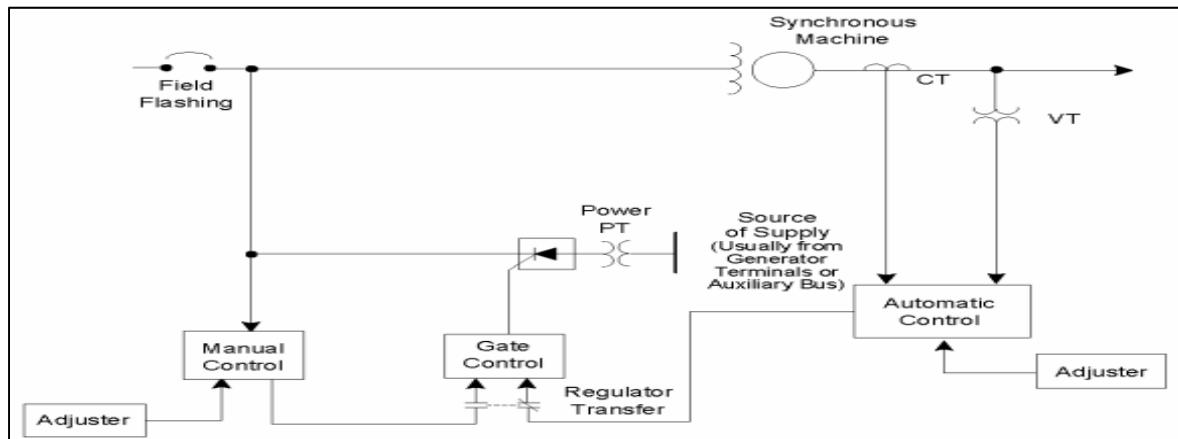


Figure 3.3 Modèle suivant la norme IEEE 421 d'une excitation statique avec redresseur commandé à source de tension

Tirée de IEEE Draft Standard Definitions (2006, 2007)

<sup>53</sup> S. Rosado, X. Ma, G. Francis, F. Wang, and D. Boroyevich, "Model-Based Digital Generator Control Unit for a Variable Frequency Synchronous Generator With Brushless Exciter," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 42-52, 2008

<sup>54</sup> M. G. McArdle and D. J. Morrow, "Noninvasive detection of brushless exciter rotating diode failure," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, pp. 378-383, 2004.

<sup>55</sup> A. Griffio, R. Wrobel, P. H. Mellor, and J. M. Yon, "Design and Characterization of a Three-Phase Brushless Exciter for Aircraft Starter/Generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 2106-2115, 2013

### **3.1.4 Contribution à la compréhension du système d'excitation dans l'environnement industriel et de recherche**

Mon étude introduit la notion d'excitatrice principale et d'excitatrice pilote. Cette contribution scientifique majeure à l'Institut de Recherche en Électricité du Québec d'Hydro-Québec et l'industrie d'Hydro-Québec, a offert une meilleure exploitation du groupe turbine-alternateur production. En effet, dans une centrale hydraulique les installations électriques du système d'excitation offrent deux horloges indicatives du courant.

Pour des années, on effectuait des opérations fonctionnelles de la centrale sans savoir à quoi ces deux horloges font référence, et qu'est-ce qui fait que si la première horloge indique un courant maximal l'autre horloge indique un courant minimal presque nul.

Suite à mon élaboration de la problématique de recherche, j'ai étalé la réalité du fonctionnement comme suit. La première horloge, indique l'aiguille de courant d'excitation pour l'excitatrice pilote, alors que l'autre aiguille indique le courant d'excitation pour l'excitatrice principale. Quand le courant de l'excitatrice pilote est maximal ceci veut dire que le démarrage de l'excitatrice pilote est en cours, il a débuté. En parallèle, le courant d'excitation de l'excitatrice principale est nul car son bobinage rotorique n'est pas alimenté encore. Au moment où ce dernier est alimenté, l'aiguille du courant d'excitation de l'excitatrice pilote tombe à zéro car l'excitatrice pilote a effectué son rôle et arrête de fonctionner, tandis que le courant d'excitation de l'excitatrice principale est maximal et reste maximal pour débuter le rôle d'alimentation pour le bobinage rotorique de l'alternateur hydro-électrique.

### 3.2 Système de contrôle, système de protection et principaux équipements

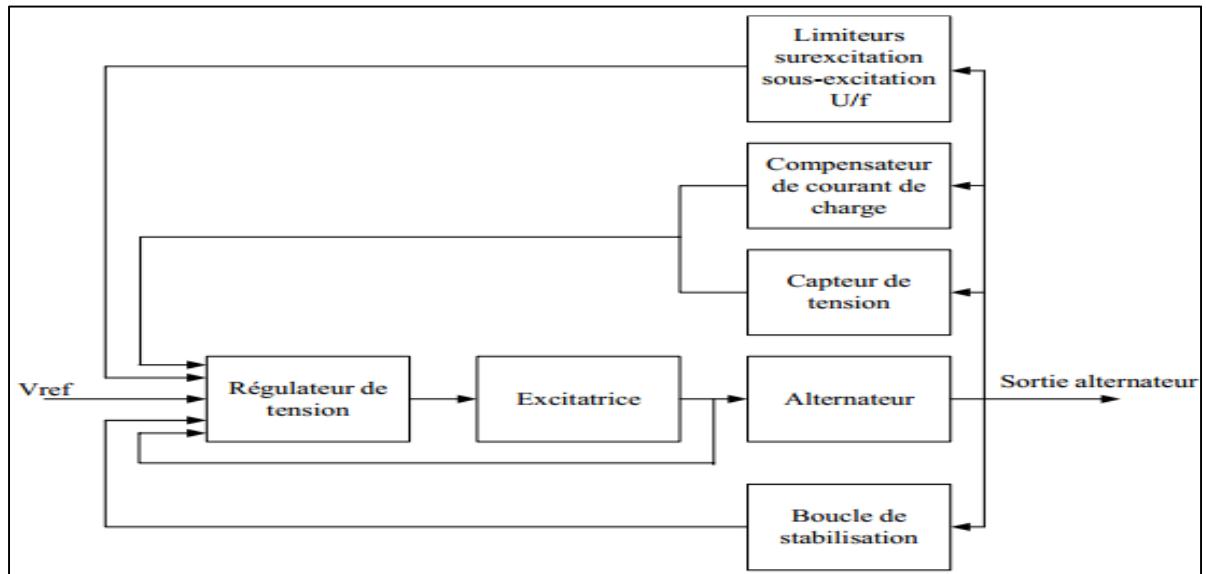


Figure 3.4 Système de contrôle du système d'excitation d'un alternateur hydro-électrique  
Tirée de IEEE Draft Standard Definitions (2006, 2007) – K. Slimani I.R.E.Q., Hydro-Québec (2005)

Les systèmes de contrôle et de protection qui accompagnent l'excitatrice, sont très importants et leur bon fonctionnement assure la sécurité du courant continu injecté au bobinage rotorique de l'alternateur hydroélectrique.

La Figure 3.4 représente le système de contrôle complet. Les principaux équipements électriques à garder en mémoire durant l'étude menée sur les systèmes d'excitation, sont :

- **le régulateur de tension** : dont le rôle est de régulariser la tension générée par l'alternateur hydroélectrique en fonction des consignes de tension et de puissance, tout en assurant la stabilité et la précision de cette tension en régime permanent et en régime transitoire ainsi que d'ajuster la tension de l'alternateur à la valeur de référence. L'écart de la valeur réelle de la tension par rapport à la valeur de référence produit une tension appropriée à la sortie de l'excitatrice. Par contre, la tension statorique alternative fournie par l'alternateur hydro-électrique est contrôlée par le régulateur de courant alternatif alors que la tension d'excitation continue fournie par le système d'excitation est contrôlée par

le régulateur à courant continu. Cette dernière est une valeur qui nécessite la protection par le régulateur de tension automatique dit AVR (Automatic Voltage Regulator).

- **le compensateur du courant de charge :** dont le rôle est d'ajuster la tension en un point autre que celui où la tension de la machine synchrone est mesurée. Il compense la chute de tension due à l'impédance d'une ligne. Il est composé d'une résistance  $R_c$  et d'une réactance  $X_c$  en série ajustables. La tension de compensation sera donnée par:

$$V_c = |E_t + (R_c + X_c)I_t| \quad (3.1)$$

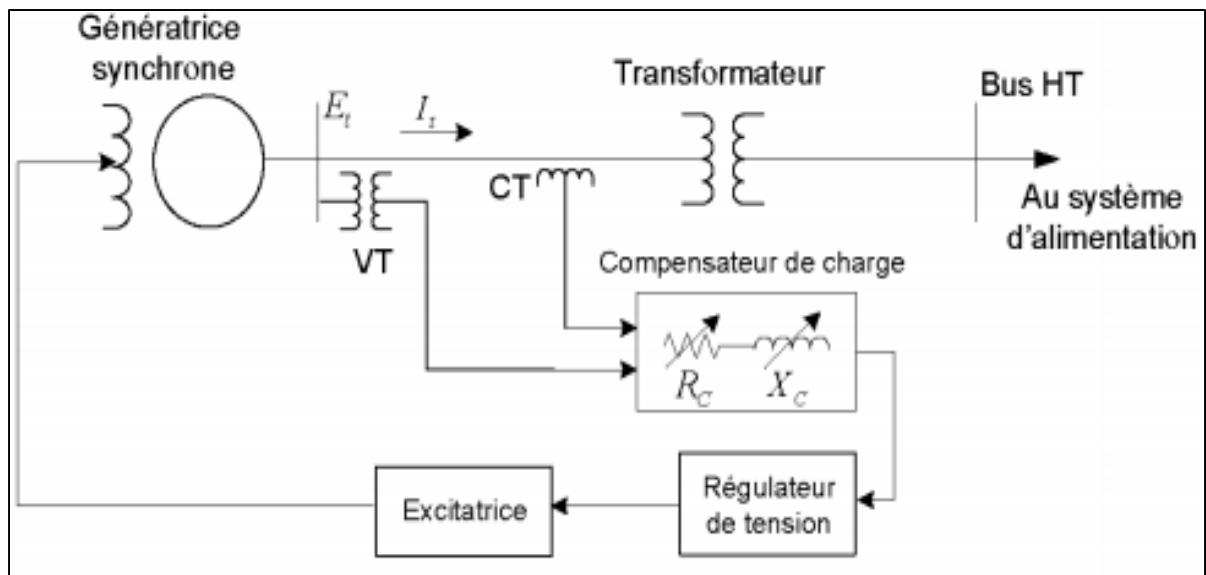


Figure 3.5 Schéma de compensateur de charge  
Tirée de IEEE Draft Standard Definitions (2006, 2007)

En effet, avec  $R_c$  et  $X_c$  positifs, Figure 3.5. La chute de tension aux bornes du compensateur est ajoutée à la tension aux bornes. Le compensateur régule la tension à un point dans le générateur et fournit ainsi une chute de tension. Ce cas s'applique quand on a deux alternateurs branchés en parallèle cherchant à appliquer le partage de la puissance réactive. D'autre part, avec  $R_c$  et  $X_c$  négatifs; le compensateur régule la tension à un point situé au-delà des bornes de la machine. Ce type de compensation est utilisé pour compenser la chute de tension à travers le transformateur élévateur du côté haute tension, Figure 3.5.

- **le limiteur de surexcitation:** dont le rôle est de limiter les courants dans la machine synchrone ainsi que dans l'excitatrice en agissant directement sur le régulateur de tension. En effet, le but du limiteur de sur-excitation est de protéger le système contre une surchauffe due à un courant de champ prolongé. Ce limiteur est également appelé limiteur d'excitation maximum dont les entrées sont le courant statorique ou le courant de champs. La fonction de limitation de sur-excitation détecte typiquement la condition de courant de champ élevé et, après un délai, agit par le régulateur de courant alternatif pour réduire l'excitation à la valeur actuelle. Si elle échoue, elle déclenche le régulateur de courant alternatif et transfère le contrôle au régulateur de courant continu et repositionne le point de consigne sur une valeur correspondant à la valeur nominale.
- **le limiteur de sous-excitation:** dont la fonction est de fixer la valeur minimale du courant déterminée par les limites de stabilité ou bien les limites thermiques de la génératrice synchrone. La définition de ses paramètres se fait suivant la courbe de capacité de l'alternateur hydro-électrique et qui est fournie normalement par le constructeur et validée par essai dans la centrale. Ainsi, le limiteur de sous-excitation constitut le seuil de contrôle minimal sous lequel l'excitation générée n'est plus acceptable. Au cas de dépassement de ce seuil, on risque de dépasser l'anneau de chauffage critique du noyau fer-stator; à ce moment le signal n'est plus dans les limites de fiabilité. Ce limiteur est également désigné par d'autres noms tels que le limiteur réactif-ampère sous-excitation et le limiteur d'excitation minimum. Il agit directement sur le régulateur de tension.
- **le limiteur du rapport ( $U/f$ ):** dont la fonction est d'éviter la saturation de la machine ou bien la saturation des transformateurs hautes tensions lorsque la vitesse de l'alternateur baisse en-dessous d'un certain seuil. Ce dispositif de réglage provoque une baisse de la tension directement proportionnelle à la baisse de vitesse. En effet, ceux-ci sont utilisés pour protéger le générateur et le transformateur élévateur des dommages dus à un flux magnétique excessif résultant de la basse fréquence et / ou de la surtension. Un flux magnétique excessif, s'il est maintenu, peut entraîner une surchauffe importante et endommager le transformateur de l'unité de production et le noyau du générateur. Le rapport est facilement mesurable et son rapport défini entre la tension et la fréquence

possède l'unité [[Volts]/[Hertz]]. C'est une valeur proportionnelle au flux magnétique circulant dans l'alternateur hydro-électrique.

- **la boucle de stabilisation** : ses entrées sont ; la vitesse de l'alternateur, la fréquence ou bien sa puissance et a pour fonction de contrôler la tension de sortie de l'excitatrice de façon à amortir les oscillations de puissance de l'alternateur. La boucle de stabilisation contient le stabilisateur de puissance PSS (Power System Stabilizer). Ces paramètres sont des signaux de stabilisation additionnels pour améliorer les performances dynamiques du système électrique global en amortissant les oscillations de puissance qui surviennent dans le cas de faibles signaux et en assurant ainsi une meilleure stabilité.
- **le pont thyristors** : dont le rôle est de redresser la tension alternative en tension continue, et ainsi produire un courant d'excitation pour le rotor de l'alternateur hydro-électrique ou de l'excitatrice principale.
- **l'excitatrice principale** : dont le rôle est de produire le courant d'excitation pour le rotor de l'alternateur hydro-électrique.
- **le disjoncteur de champ** : dont le rôle est d'interrompre le courant de champs ou bien le courant de défaut au niveau du rotor de l'alternateur hydro-électrique.

Le circuit de protection est le même associé aux différents types de système d'excitation; les types rotatifs et le type statique. Il est à mentionner que le courant de champ n'est pas inversé. Dans certaines situations particulières, l'inversion du courant de champ est le résultat d'un phénomène mécanique présent ou un phénomène électrique encouru comme dans le cas de présence d'un 'sleeping pole' dans la machine et le cas de défaut de court-circuit statorique dans l'alternateur hydro-électrique. Dans le cas où le circuit de protection n'existe pas, la tension produite est très élevée, ce qui endommagera l'enroulement rotorique de l'alternateur hydro-électrique.

D'autre part, il existe deux circuits différents qui sont fournis. Le premier circuit est constitué d'une commande de thyristor et d'une résistance de décharge de champ en parallèle à l'enroulement de champ de la machine synchrone. Dans ce premier circuit, un thyristor est

mis en place. Le moment où la tension d'excitation devient supérieure à la valeur limite admissible, ce thyristor est en circuit ouvert permettant ainsi au courant de circuler dans le sens inverse, et se comporte en circuit fermé quand le courant d'excitation circule dans la bonne direction. De même, en raison de défauts encourus sur la tension aux bornes de l'alternateur hydro-électrique, les tensions produites sont en sens inverse. Le rôle du circuit de protection ici est de permettre la circulation normale de la tension, sinon elle devient élevée et supérieure au seuil limite maximale permis ce qui est dangereux et cause la dégradation mécanique de l'enroulement de champ de l'alternateur hydro-électrique.

Le second arrangement que l'on utilise est le circuit de la varistance, qui est une résistance non-linéaire. Lorsque la tension à travers ce circuit est inférieur à une certaine valeur, il offre une résistance élevée et lorsque la tension dépasse une certaine valeur, il offre une résistance élevée et permet au courant de champ de circuler dans le sens négatif. Les deux dispositions qui sont prévues constituent une protection spéciale de l'enroulement de champ du générateur synchrone

Enfin, les systèmes de régulation et de stabilisation, comme les régulateurs de tension des alternateurs hydro-électriques ou des compensateurs de charge statiques et les signaux de stabilisation des alternateurs ou des convertisseurs à courant continu, ont des effets bénéfiques sur la stabilité du réseau. Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité du réseau à faible coût. L'amélioration de la performance des systèmes de régulation et de stabilisation du réseau par une meilleure adaptation de leurs caractéristiques aux conditions d'exploitation de la centrale, retombe à l'amélioration de la fiabilité du réseau.

### **3.3 Exigences et fonctionnalités rapportées au fonctionnement du système d'excitation**

Les exigences de performances d'un système d'excitation sont déterminées par l'alternateur hydro-électrique et par le circuit d'alimentation. Pour remplir son rôle de manière satisfaisante, le système d'excitation doit répondre aux exigences suivantes :

- respecter les critères imposés par le cahier de charge.

- fournir les limitations nécessaires en cas de surcharges pour assurer la protection de l'excitatrice et des autres équipements comme : la turbine, l'alternateur hydro-électrique, le réseau, etc. Le courant de l'inducteur principal peut-être limité par la tension de sortie de la machine à l'aide des limiteurs du système d'excitation.
- assurer une flexibilité d'opération, de régulation et de stabilisation en respectant les exigences techniques de la centrale en améliorant la qualité des signaux qui présentent un taux de distorsion assez important.

Assurer la fiabilité et la validité des équipements du système à amortir les oscillations de puissance au niveau de l'alternateur.

Les fonctionnalités d'un système d'excitation sont principalement de produire et de régulariser la tension du réseau électrique, tout en assurant la stabilité et la précision de celle-ci en régime permanent et en régime transitoire. Le système de contrôle et de protection, a pour rôle :

- d'assurer le réglage de tension dans les conditions normales de fonctionnement. On parle du comportement vis-à-vis des petites perturbations, c'est à dire lorsque les conditions extérieures appliquées, notamment la tension, ne varient pas simultanément avec une grande amplitude et une grande rapidité. La surexcitation est ainsi caractérisée par le plafond et le facteur de réponse. Les exigences d'Hydro-Québec à ce niveau sont +13 pu et -13 pu pour la tension de plafond. Pour le courant de plafond il doit être au moins égale à 1.6 fois le courant nominal et doit être capable de fournir ce courant durant au moins 30 s [56].<sup>56</sup>
- de contribuer au rétablissement de conditions normales de fonctionnement à la suite de variations brutales et de grande amplitude des conditions extérieures appliquées. On considère alors le comportement du système d'excitation vis-à-vis des grandes perturbations par exemple une chute de tension ou de puissance active importante et brutale, dues à un court-circuit survenant dans le voisinage de la machine synchrone ou à une manœuvre de ligne dans le réseau. Le système d'excitation doit être conçu pour

---

<sup>56</sup> K.Slimani, "Besoins et contraintes d'exploitation de l'unité d'affaires concernant les systèmes d'excitation des alternateurs ." I.R.E.Q., Hydro-Québec2005.

donner une sur-excitation notable réduisant la chute de tension transitoire que subissent les récepteurs proches de la machine synchrone, dans le cas d'une surtension qui se produit lors d'un déclenchement de la machine synchrone fonctionnant initialement en charge. Une désexcitation est demandée de façon à maintenir la surtension aux bornes de la génératrice dans des limites non dangereuses [57]<sup>57</sup>.

### 3.4 Comparaison entre les différentes caractéristiques des types d'excitation

Tableau 3.1 Performances des différents systèmes d'excitation

<b>Caractéristiques</b>	<b>Performances des différents systèmes d'excitation</b>			
	<b>Excitation statique alimentée en tension.</b>	<b>Excitation statique à source composée.</b>	<b>Excitatrice tournante à source brushless.</b>	<b>Excitatrice tournante CC ou CA.</b>
<b>Temps de réponse rapide.</b>	Oui	Oui	Non, à moins que l'on utilise un système à thyristors	Non
<b>Plafond de tension</b>	Élevé	Élevé	Faible	Faible
<b>Maintien de l'excitation en cas de défaut.</b>	Non	Oui	Oui, s'il y a une alimentation auxiliaire pour l'excitation	Oui, s'il y a une alimentation auxiliaire pour l'excitation
<b>Maintenance générale.</b>	Bagues et balais	Bagues et balais	Vérification des interrupteurs électroniques tournants	Bagues et balais

L'excitation statique comporte deux types de source d'alimentation. Ainsi le Tableau 3.1 présente quatre colonnes pour les trois catégories de circuits d'excitation.

---

<sup>57</sup> K.Slimani, "Besoins et contraintes d'exploitation de l'unité d'affaires concernant les systèmes d'excitation des alternateurs ." I.R.E.Q., Hydro-Québec2005.

Les avantages d'un système d'excitation rotative courant alternative à diodes rotatives sont le manque de contacts rotatifs, l'immunité au système de perturbation et la taille compacte. D'autre part ses inconvénients sont le coût élevé de maintenance, la réponse lente à la dé-énergétisation, les coûts élevés des unités, la présence d'une excitatrice pilote.

Les avantages du système d'excitation statique sont le faible coût, le manque d'une machine électrique tournante, la capacité de réponse rapide, la dé-énergétisation rapide, la facilité dans l'opération des travaux de maintenance technologique, le faible taux en temps d'arrêt, le disjoncteur de champ qui peut être remplacé par un disjoncteur AC.

Par contre, parmi ses inconvénients, on cite la vulnérabilité aux perturbations du système, la tension transitoire élevée qui force l'enroulement de champ à chaque changement de surtension forcée et la présence des bagues collectrices.

L'avantage principal du système d'excitation rotative type courant continu c'est la robustesse. D'un autre côté, le système est ancien, la durée de vie est limitée vu la présence des collecteurs, la présence d'une excitatrice pilote, les coûts de maintenance et le temps de réponse lent.

### **3.5 Modes opérationnels de l'alternateur hydro-électrique La Grande 4**

La conception d'un alternateur hydro-électrique se fait en se basant sur une étude de la coordination entre le système d'excitation, la machine synchrone et la demande du réseau. Le but de chaque centrale de puissance est de délivrer le maximum de puissance active puisqu'une fois la puissance réactive est transmise en grande quantité, ceci va baisser la transmission dans les lignes et va augmenter les pertes. Afin de maintenir le synchronisme, le système d'excitation est responsable de la quantité de puissance réactive que l'alternateur peut produire ou bien peut absorber [58]<sup>58</sup>.

---

<sup>58</sup> E. Pajuelo, R. Gokaraju, and M. S. Sachdev, "Coordination of overexcitation limiter, field overcurrent protection and generator control." pp. 1-7

La courbe de capacité d'une machine synchrone en mode alternateur est dérivée du diagramme détaillé Figure 3.6 de la puissance apparente S et de ses composantes de puissance active P versus la puissance réactive Q [59]<sup>59</sup>.

Le mode alternateur représenté sur la courbe de capacité, est dérivé du diagramme des phases de la machine hydro électrique.

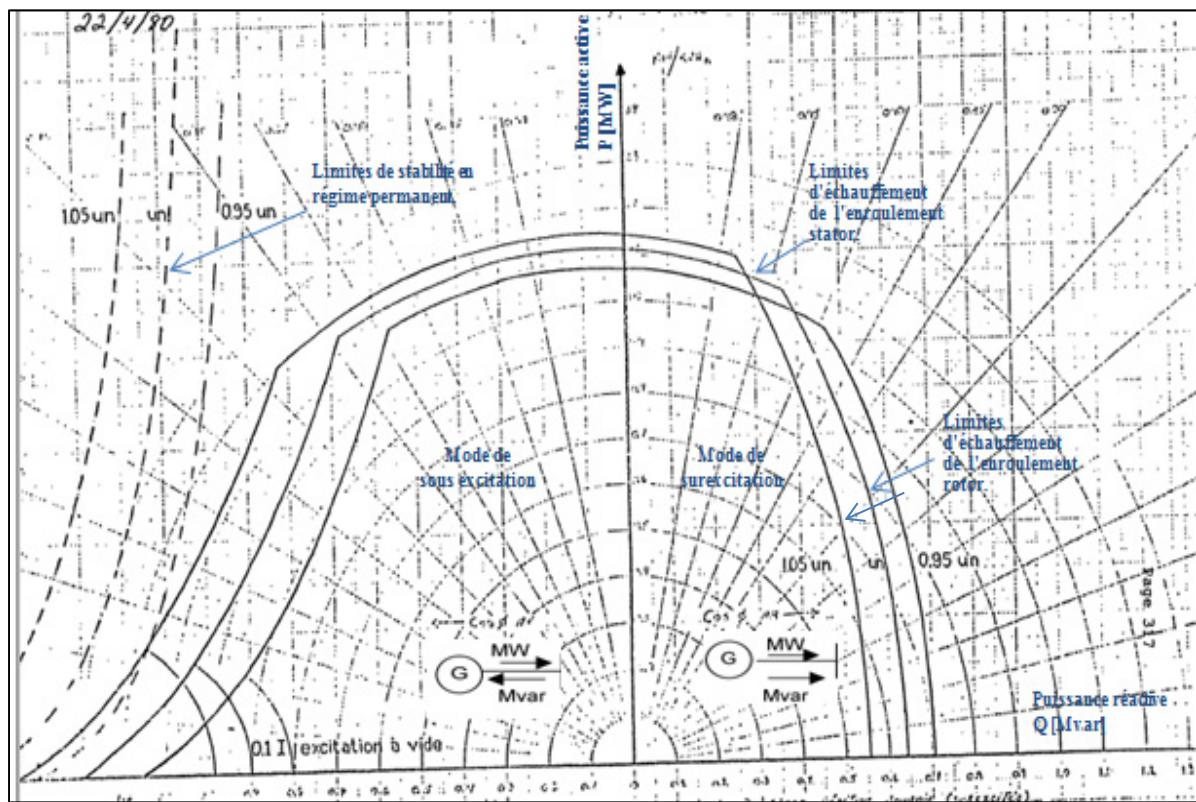


Figure 3.6 Courbe de capacité de La Grande 4 incluant ses limites d'opération

Les générateurs synchrones sont généralement évalués en termes de puissance apparente maximale (kVA ou MVA) à un facteur puissance spécifique (souvent 80, 85 ou 90% de retard) qu'ils peuvent transporter en continu sans surchauffe.

<sup>59</sup> E. Pajuelo, R. Gokaraju, and M. S. Sachdev, "Coordination of overexcitation limiter, field overcurrent protection and generator control." pp. 1-7

La puissance de sortie réelle du générateur est généralement limitée à une valeur comprise dans la puissance apparente par la capacité de son moteur principal. Grâce à son système de régulation de tension relative au circuit d'excitation (qui contrôle le courant de champ en réponse à la valeur mesurée de la tension aux bornes), la machine fonctionne normalement à une tension aux bornes constante et dont la valeur de la fluctuation est comprise entre 4 et 5%<sup>60</sup> de la tension nominale [60].

Lorsque la charge de puissance réelle et la tension sont fixes, la charge de puissance réactive admissible est limitée par le chauffage par induit ou par champ d'excitation. Les courbes de capacité fournissent un guide précieux à la fois aux planificateurs de systèmes d'alimentation et aux opérateurs. À mesure que les planificateurs de système envisagent des modifications et des ajouts aux systèmes d'alimentation, ils peuvent facilement voir si les divers générateurs existants ou proposés peuvent fournir en toute sécurité les charges requises. De même, les opérateurs du groupe de production turbine/alternateur/système d'excitation peuvent rapidement voir si des générateurs individuels peuvent réagir en toute sécurité aux changements de charge du système qui se produisent pendant le fonctionnement normal du système.

La dérivation de courbes de capacité telles que le fonctionnement dans des conditions de tension d'excitation aux bornes constante et de courant d'induit (à la valeur maximale autorisée par les limites de chauffage) correspond à une valeur constante de la puissance de sortie apparente déterminée par le produit de la tension et du courant aux bornes.

Puisque la puissance apparente par unité s'exprime en fonction de P et de Q où P représente la puissance réelle par unité et Q représente la puissance réactive par unité, on voit qu'une puissance apparente constante correspond à un cercle centré sur l'origine sur un graphique de puissance réactive par rapport au pouvoir réel. Notez également que pour une machine à pôles lisses, pour une tension d'excitation aux bornes constante, une puissance apparente constante correspond à un courant d'enroulement d'induit constant et, par conséquent, à un chauffage d'induit-enroulement constant.

---

<sup>60</sup> D. m. Hydroélectrique, S.E.B.J. Centrale La Grande 4 –Essai de réception en centrale 1987

Un tel cercle, correspondant au niveau maximum acceptable de chauffage de l'induit. De même, envisager un fonctionnement lorsque la tension d'excitation est constante et que le courant de champ est limité à une valeur maximale, également déterminée par les limites de chauffage. Cette équation correspond à un cercle centré sur Q et détermine la limitation du chauffage sur le site du fonctionnement de la machine.

Il est souvent important de spécifier la valeur nominale (puissance apparente et facteur de puissance) de la machine étudiée en tant que point d'intersection des courbes de limitation du chauffage de l'induit et du champ d'excitation.

### **3.5.1 Hypothèses imposées dans la simulation par éléments-finis de Maxwell**

Les hypothèses imposées lors de la simulation de l'alternateur hydro-électrique sont:

- une asymétrie au niveau du stator seulement.
- une carcasse étant une cage d'air, elle n'est pas incluse dans le modèle.
- des conditions aux limites sont automatiquement générées par Maxwell 2D de façon à ce que le vecteur potentiel  $A_z$  soit nul. Cette hypothèse revient à dire que l'induction magnétique B normal est nul sur les frontières.
- une résolution des équations de Maxwell se fait en formulation magnétodynamique en vecteur scalaire  $A$  et phi.
- les attaches des pôles rotor et des tôles stator ne sont pas modélisées.
- les propriétés magnétiques sont les mêmes sur toute la hauteur de l'empilage statorique dans le modèle Maxwell 2D généré.
- un axe z est nul; ainsi le courant de l'inducteur circule dans la direction de l'axe z perpendiculaire au plan (x,y).

La répartition de la densité du flux magnétique et des courants statoriques est considérée identique dans chaque plan le long de toute la longueur de la machine. Ce qui réduit le temps de calcul d'une façon remarquable.

La technique de modélisation par éléments-finis est la même adoptée préalablement au chapitre 2 du mémoire et elle est démontrée par l'utilité d'imposition des hypothèses de simulation aussi, tel que:

- l'étude de l'état de la machine connectée à une charge équilibrée et une charge déséquilibrée par observation des harmoniques secondaires du côté rotor.
- l'étude simplifiée de non-linéarité de la machine par soumission au test à vide et en court-circuit.
- modélisation complète de tous les éléments de la machine synchrone conformément aux plans de conception fournis.
- l'étude inclue les paramètres de la machine comme les propriétés des matériaux magnétiques par validation des essais de conceptions suivant la norme IEEE 115.

### **3.6 Hypothèses d'étude et résultats des modes de fonctionnement de l'excitation de l'alternateur hydro-électrique La Grande 4**

La Grande 4 possède un système d'excitation statique, donc de catégorie statique détaillée à la section 3.1.3. La courbe de capacité établie à la Figure 3.6, représente l'état stable des limites d'opération du générateur en régime nominal indiquant la courbe de tension de ligne nominale  $U_n$ .

La zone à gauche de l'axe de puissance P de la même figure, permet de situer l'alternateur dans le mode sous-excité dans lequel il produit de la puissance active et il absorbe de la puissance réactive. Tandis que la zone à droite permet de représenter l'alternateur en mode sur-excité dans lequel la machine produit de la puissance active et de la puissance réactive.

Cette fonction n'est généralement pas utilisée en régime où il y a une variation brusque dans la charge qui cause la machine hydro-électrique à fonctionner en mode de fonctionnement de

sur-excitation ou bien en mode de fonctionnement de sous-excitation. La courbe de capacité de l'alternateur hydro-électrique impose ainsi deux hypothèses à respecter lors de notre étude de cas en modes de fonctionnement de l'excitation de La Grande 4.

Le constructeur en global, donne une valeur de la puissance apparente nominale car un alternateur produit en même temps P et Q en fonction des besoins de la charge à alimenter. Un excès de puissance réactive revient à sur-exciter l'alternateur hydro-électrique et risque de détériorer son bobinage rotor. Alors qu'un excès de puissance active revient à augmenter le courant de charge avec un risque de détériorer son bobinage stator.

Il faut veiller toujours à ne pas dépasser les valeurs nominales indiquées par le constructeur de La Grande 4, sinon le risque de destruction des enroulements inducteurs par échauffement augmente.

Il est important de mentionner que quand la machine synchrone est sous-excitée, on détecte un échauffement au niveau du stator. Les limites d'échauffement des enroulements du stator et du rotor ainsi que les limites externes sur la machine hydro-électrique modélisée sont exprimées graphiquement Figure 3.6.

Le facteur de puissance indique si la charge se comporte de façon inductive, capacitive ou résistive et dont le dimensionnement se trouve au Tableau 3.2. En effet, dans une charge capacitive on retrouve les éléments résistifs et capacitifs:

$$Z = R - jX_C \quad (3.2)$$

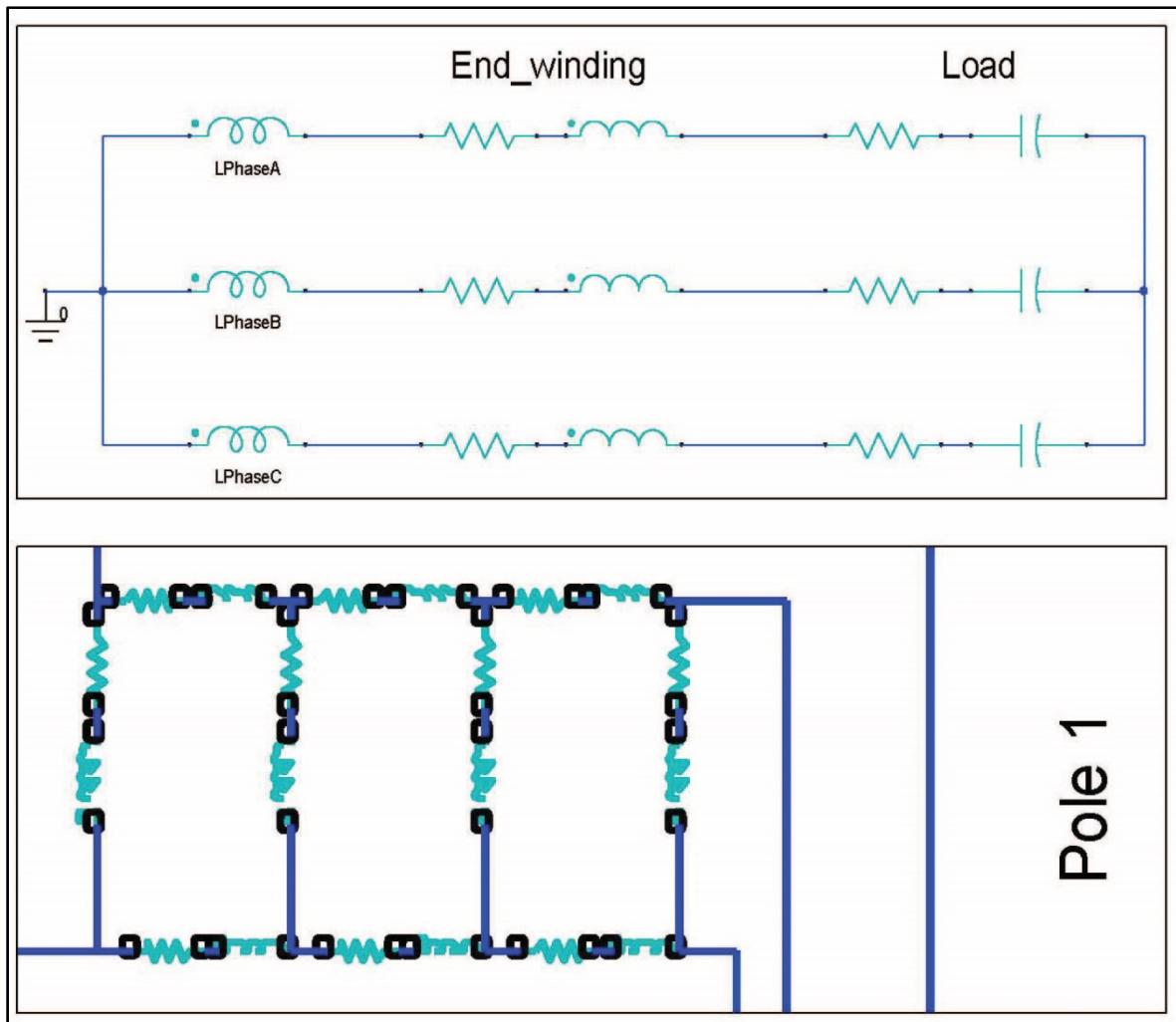


Figure 3.7 Circuit externe partiel en mode sous-excité du modèle 2D de La Grande 4

Les équations de puissances s’expriment:

$$S = 3VI \cos\phi + j3VI\sin\phi \quad (3.3)$$

$$|S| = 3VI \quad (3.4)$$

$$Q = -3I^2X_c = 3V I \sin\phi \quad (3.5)$$

$$P = 3RI^2 = 3VI \cos\phi \quad (3.6)$$

En effet, le circuit externe change d'un mode d'opération à l'autre. C'est un circuit externe complet qui est utilisée mais changeable aux extrémités statoriques, Figure 3.7.

Tableau 3.2 Caractéristiques obtenues de La Grande 4 pour les modes de fonctionnement

Charge / Caractéristiques	Capacitive	Inductive
<b>Nombre de pôles</b>	56	56
<b>Nombre d'encoche</b>	408	408
<b>Courant nominal In [A]</b>	12969.2	12969.2
<b>Courant d'excitation If [A]</b>	1190	1800
<b>Courant de ligne crête [A]</b>	16140	16960
<b>Courant de ligne efficace [A]</b>	11420.34	11977.47

Par application numérique on obtient le dimensionnement suivant du circuit externe représenté partiellement à la Figure 3.7, et de son impédance de charge en modes de fonctionnement:

$$I_\emptyset = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{310\text{MVA}}{\sqrt{3}13800} = 12\ 969,5\text{ A} ; V_\emptyset = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7\ 969.44\text{ V}$$

$$\cos \emptyset = 0.95 \quad \text{donc} \quad \emptyset = 18^\circ 19$$

$$Q = 3V_\emptyset I_\emptyset \sin \emptyset = 96772704 \text{ VAR}; \quad \underline{\text{Or}} \quad Q = -3I^2X_c$$

$$X_C = \frac{1}{C\omega} \quad \underline{\text{avec}} \quad \omega = 2\pi f \quad \underline{\text{Alors:}} \quad C = 0.0415 \text{ F}$$

Dans le modèle valide 2D, la machine est simulée sous deux courants d'excitation de 0.092 pu et 0.138 pu émis après réglage et contrôle du système d'excitation statique pour alimenter le bobinage rotorique de La Grande 4.

La distribution de l'induit dans les barres d'amortissements des courants obtenus pour 1190 A et 1800 A. Afin de mettre en évidence les phénomènes électromagnétiques affectés dans les barres d'amortissement de la Figure 3.7, on illustre les résultats des grandeurs A [Wb/m] et J [A/m<sup>2</sup>] [61]<sup>61</sup>.

Afin d'étudier la distribution de la densité de courant J dans les barres amortisseurs, on simule le modèle par élément-finis conçu de La Grande 4 pour une charge capacitive-résistive [gauche] et de charge inductive-résistive [droite] de la Figure 3.8. Cette grandeur physique est une image du courant d'excitation car elle est détectée dans les barres d'amortissements des pôles rotoriques voir Figure 3.7 et reflète ainsi le résultat électromécanique du système d'excitation statique sous-étude.

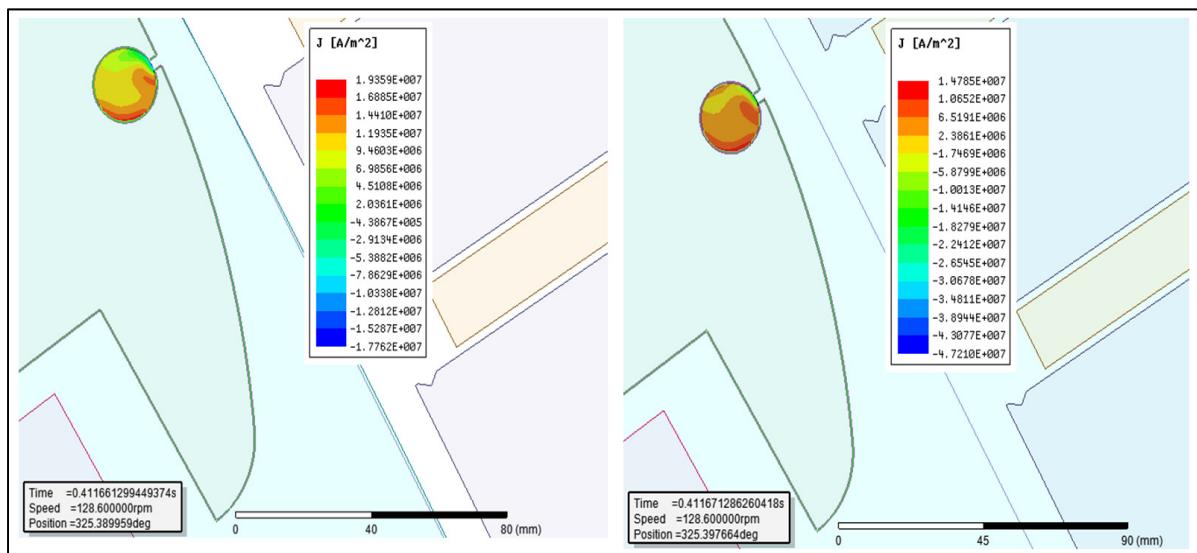


Figure 3.8 Distribution de la densité de courant J dans les barres amortisseurs du rotor

La technique de modélisation consistait à tracer un point dans l'entrefer pour pouvoir en tirer le flux magnétique y circulant et qui représentent deux modes de fonctionnement critiques et non nominaux du système d'excitation statique de La Grande 4. Ensuite, on a analysé le résultat vers la représentation spatiale en degré (normalisés) de la Figure 3.8, Figure 3.9 et

<sup>61</sup> Cynthia Moussa; Kamal Al-Haddad; Bachir Kedjar; Arezki Merkhouf; "Insights Into Digital Twin Based on Finite Element Simulation of a Large Hydro Generator" Washington DC, United States of America, IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society

Figure 3.11 tel que la distribution spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer pour une charge inductive-résistive allure en rouge et une charge capacitive-résistive allure en bleue de La Grande 4 de la Figure 3.9.

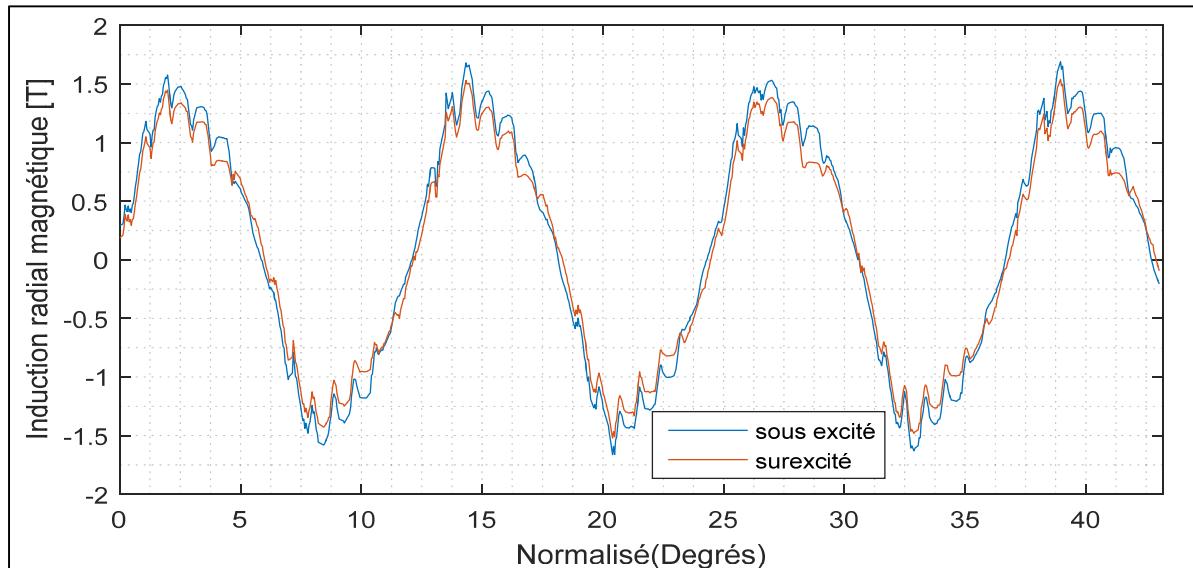


Figure 3.9 Distribution spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer de La Grande 4

De façon expérimentale, le point dans l'entrefer était placé dans l'intention de tirer le flux magnétique temporel et par traitement de signal, le résultat est obtenu représentant le quart de l'alternateur hydro-électrique dans l'intervalle de symétrie magnétique  $[0;45^\circ]$ , tel que exprimé dans la Figure 3.9.

Ainsi, cette étude a contribué au développement de la représentation temporelle vers une autre représentation spatiale normalisée en degré, justifiant les bonnes hypothèses imposées tout au long de la modélisation. Le courant dans les barres d'amortissement Figure 3.7 ne représente pas une sinusoïde parfaite mais aléatoire pour les deux modes de fonctionnement du système d'excitation, Figure 3.10

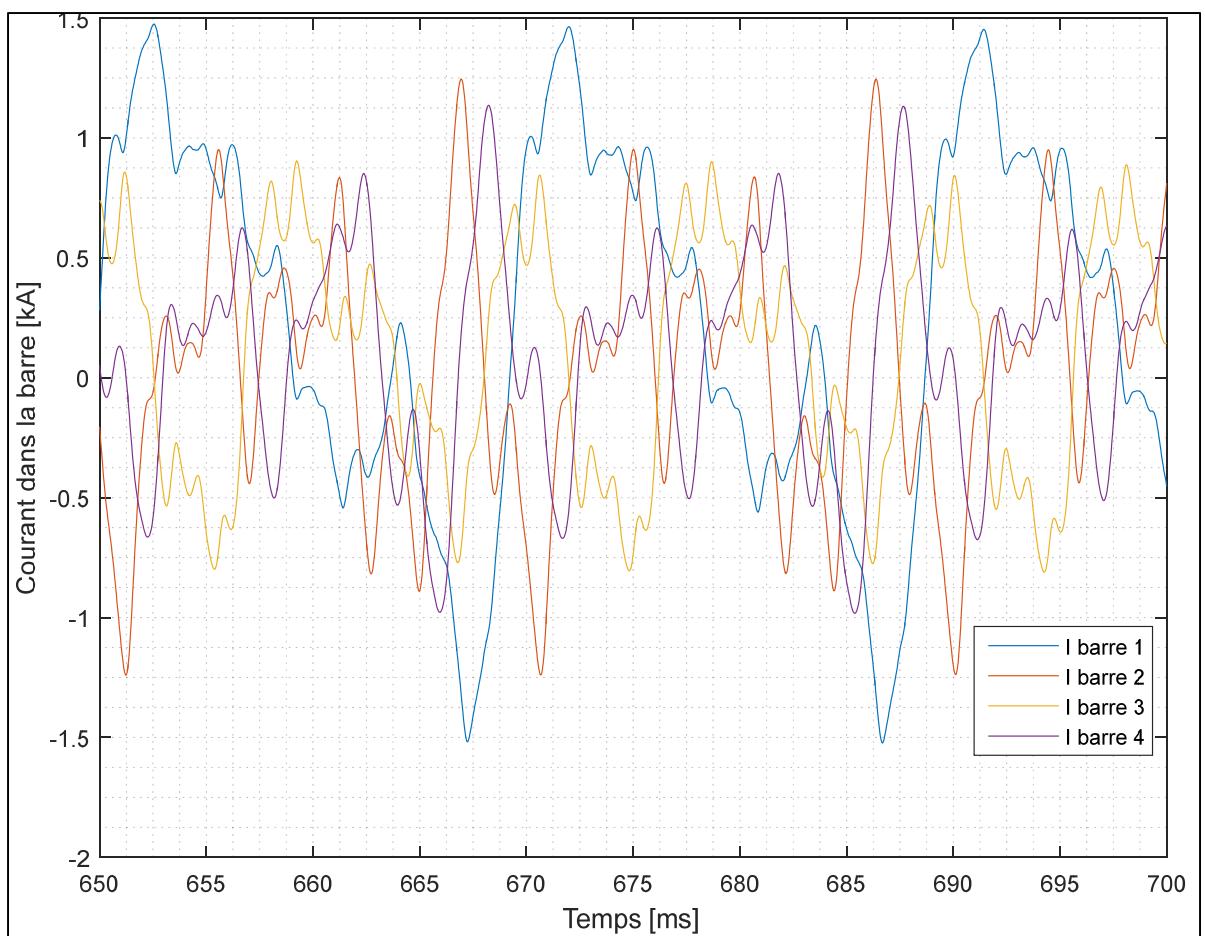


Figure 3.10 Courant dans les quatre barres amortisseurs en mode de fonctionnement sur-excité

La Figure 3.11 a démontré une possibilité de détection du fonctionnement de l’alternateur hydro-électrique par comparaison entre l’induction magnétique des modes de fonctionnement nominal, sur-excitation et sous-excitation:

- en sur-excitation ou représentation bleue spatiale Figure 3.9, l’amplitude présente une augmentation de 20% par rapport au fonctionnement normal nominal Figure 3.11.
- en sous-excitation ou représentation rouge spatiale de la Figure 3.9, l’amplitude présente une augmentation de 11 % par rapport au fonctionnement normal nominal voir Figure 3.11.

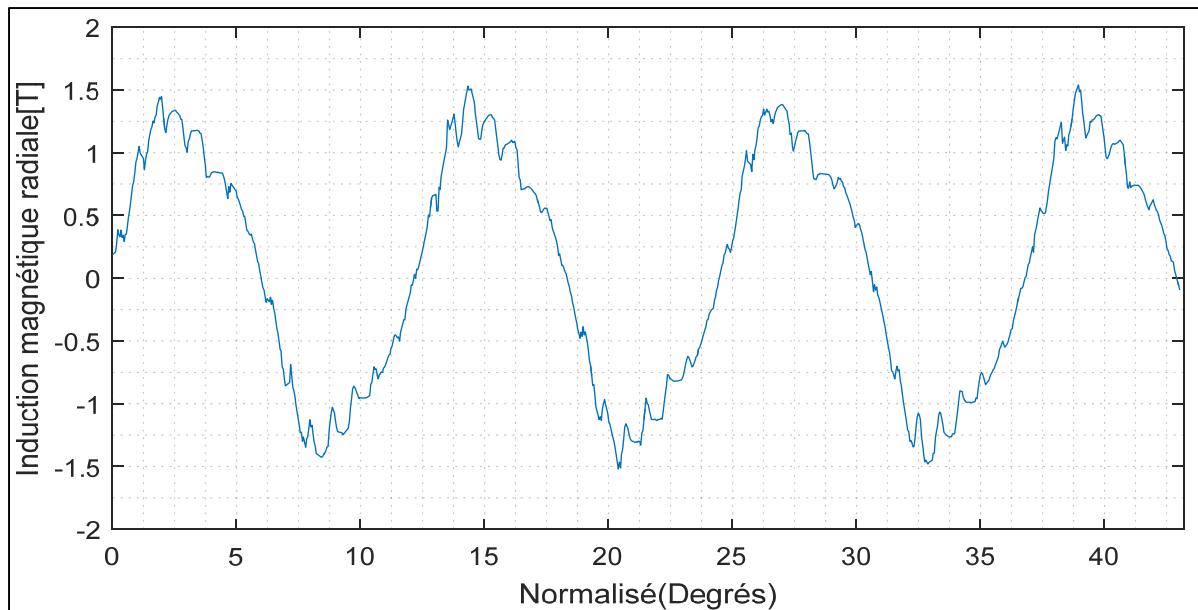


Figure 3.11 Induction magnétique spatiale à charge nominale de La Grande 4

### 3.7 Conclusion

En se basant sur la courbe de capacité de l'alternateur hydro-électrique de La Grande 4 et les hypothèses imposées, l'étude présentée est complète de façon à modéliser l'alternateur hydro-électrique, ses barres d'amortissements, son stator, son rotor et son excitation pour un mode de fonctionnement nominal, un mode de fonctionnement sur-excité et un mode de fonctionnement sous-excité.

Mon étude a contribué à la définition des deux modes de fonctionnement non nominaux et de leur circuit externe, en plus de sa contribution dans la compréhension du fonctionnement des différents types de systèmes d'excitation en centrale avec l'imposition du test d'excitation et les résultats obtenus sont conforme à la norme IEEE 421.

## CHAPITRE 4

### MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE DES SYSTÈMES D'EXCITATION

#### **4.1 Mise en contexte**

Dans le cadre de cette étude, les moyens permettant l'analyse du système d'excitation sont expliqués et mis en œuvre avec un cas d'étude. Le but était la réalisation d'une méthodologie s'articulant autour de l'analyse par construction de l'arbre de défaillance faisant partie du concept d'optimisation de la maintenance par la fiabilité.

Depuis des années, Hydro-Québec a adopté une stratégie d'entretien basée sur les types de maintenance : une maintenance préventive et, plus récemment une maintenance conditionnelle basée sur le diagnostic de l'état des dégradations des installations et des équipements de la division d'Hydro-Québec Production qui détient un parc comprenant soixante centrales hydro-électriques, dont 347 groupes turbines-alternateurs.

En effet, le vieillissement des équipements influe sur l'entretien des centrales hydro-électriques. L'estimation du niveau de dommage et de l'espérance de vie résiduelle représentant un aspect essentiel à l'élaboration d'un échéancier d'entretien et à la politique de remplacement des composants. Pour cela, le volet diagnostic est devenu d'une actualité qui vise chaque section du groupe turbine-alternateur sans excepter le système d'excitation. Cet investissement et cette coordination des activités de maintenance est essentielle à l'étude de la pérennité et qui constitue des axes de recherche et de développement cruciaux aujourd'hui et pour les années à venir. En conséquence, cette étude est importante et contribue au rassemblement et à la valorisation structurelle de l'information des mécanismes de défaillance et de dégradation des systèmes d'excitation en particulier.

#### **4.2 AMDE**

La notion d'analyse des modes de défaillance et des effets AMDE est introduite par l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec pour des analyses de fiabilité afin de servir le besoin pour une

méthode systématique, mesurable et efficace de détermination de la sécurité du profile du système. Ce concept est basé sur le modèle de la NASA. Le but principal est de fournir un outil de diagnostic et de faire une proposition de maintenance pour régler l'erreur et restaurer la condition de l'alternateur au niveau de chaque état physique, pour augmenter la durée de vie des équipements électriques dans la centrale hydraulique et réduire les coûts de la maintenance globale.

L'optimisation de la maintenance est obtenue par une approche compréhensive formée d'une succession d'états physiques de dégradation, qui décrit l'état actuel du système d'excitation par une motion dite de bonne condition - de mauvaise condition, ou bien par une échelle 1 (moins fréquent) à 5 (plus fréquent).

#### **4.2.1 Méthodologie**

Suivant l'état de l'art, la chaîne de cause à effet se définit pour une analyse basée sur le processus du modèle de Markov, qui est amélioré plus tard avec la méthode de Beyington , Roamer et Galie (2002) qui se base sur la connaissance acquise pour étudier tous les symptômes variables observables et les relier à tous mécanismes de dégradation possible à travers l'identifications des états physiques et des états physiques intermédiaires [20].

Chaque état physique est défini suivant une identification de symptômes soit des mesures en ligne, des observations ou bien des tests périodiques afin d'identifier les contributeurs importants à la défaillance du système complet d'excitation.

La défaillance est originaire d'une ou bien d'une combinaison de quatre stressses: le stresse thermique, le stresse électrique, le stresse ambiant et le stresse mécanique.

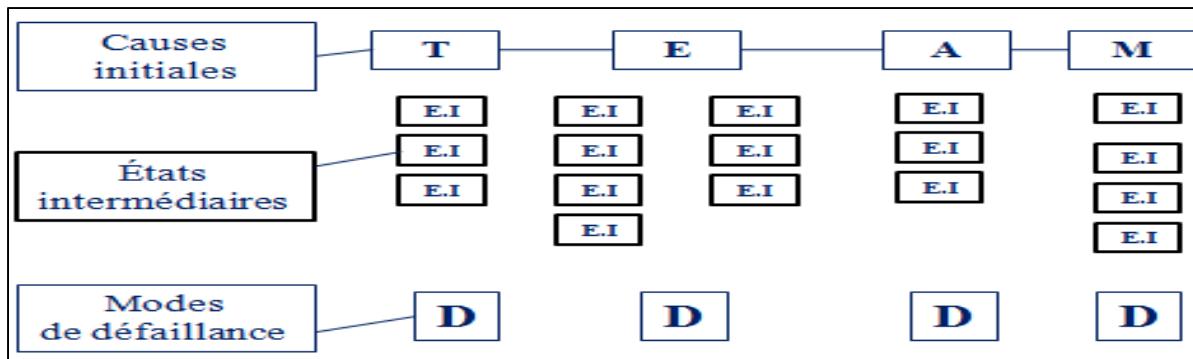


Figure 4.1 Stratégie de définition de l'arbre de défaillance pour les types de système d'excitation

La structure de l'arbre a été construite et définie pour le stator et le rotor de l'alternateur hydro-électrique. Un travail se fait au niveau de la turbine alors que dans le cadre de mon étude j'ai contribué à la définition de cet arbre pour les types de système d'excitation, Figure 4.1.

Chaque mécanisme est utilisé pour évaluer, de façon simple l'influence d'une variation de la probabilité de découverte des défaillances lors d'essais ou d'entretien préventif sur la fiabilité au démarrage fourni par le système d'excitation pour le groupe turbine-alternateur. Le logiciel Yed est utilisé pour la modélisation par arbre de défaillance. Ces coupes minimales seront utilisées pour calculer les facteurs d'importance afin d'identifier les causes majeures à la défaillance.

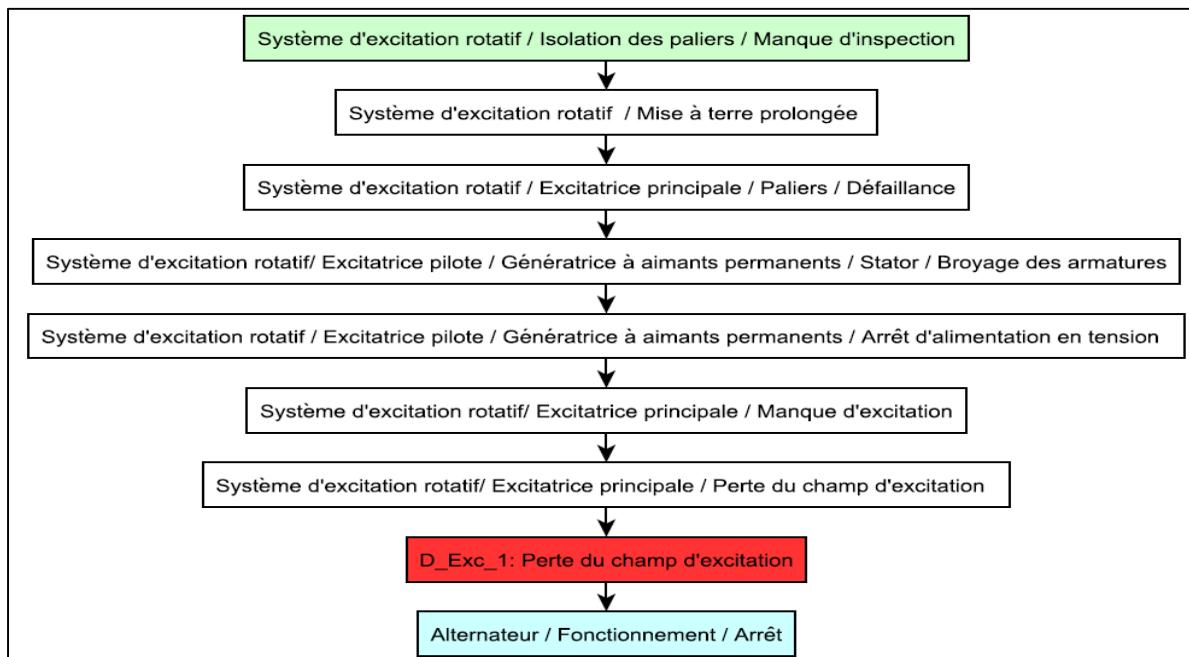
#### 4.3 Validation des arborescences des systèmes d'excitation.

**Code de couleurs:**

	Causes initiales
	États intermédiaires
	Mode de défaillance
	Équipement à l'extérieur du système d'excitation.

#### 4.3.1 Mécanismes du système d'excitation rotatifs

L'explication du lien, phénomène physique ou lien de cause à effet de l'État 1 à l'État 2 se fait par déduction, Figure 4.2. L'altération du bon fonctionnement d'un équipement électromécanique du système dans une centrale hydro-électrique est causée par le manque d'inspection hebdomadaire de l'isolation au sol des paliers de l'excitatrice principale.



Ceci empêche la détection de la mise à la terre prolongée du système d'excitation type rotatif. Cet incident se propagea vers le stator de l'excitatrice pilote, aboutissant au broyage des armatures à l'intérieur de la génératrice à aimants permanents à cause du court-circuit provoqué. La dégradation évolua dans le circuit d'excitation. L'alimentation en champ d'excitation de l'excitatrice principale s'arrête pour aboutir à une perte du champ d'excitation. Les dégâts se sont propagés pour endommager l'alternateur hydro-électrique et causer son arrêt immédiat. Le vieillissement est un facteur important dans cet incident vu que le système

d'excitation utilisé était vieux et âgé. De ce fait, l'altération du bon fonctionnement d'un équipement électromécanique du système a été affectée.

Les systèmes d'excitation ont la particularité de détecter la présence d'une excitatrice à diodes tournantes. Cette dernière fournit le courant d'excitation au bobinage rotorique de l'alternateur hydro-électrique. Ce type de système d'excitation empêche le bruit généré par l'électronique de puissance influençant le champ électromagnétique.

Les systèmes d'excitation dynamique avec source motrice portent leur nom car ils utilisent un moteur comme source d'énergie afin de générer le courant d'excitation. Seulement seize groupes turbines-alternateurs utilisent ce modèle d'excitation chez Hydro-Québec. Les composantes des sous-systèmes sont différemment utilisées comme: le régulateur de tension, l'excitatrice principale et les circuits de protection. Le régulateur de tension ajuste le courant au stator de la machine amplidyne afin d'ajuster la tension de sortie de l'alternateur. Le nom provient de sa fonction d'amplification de la tension qu'il applique.

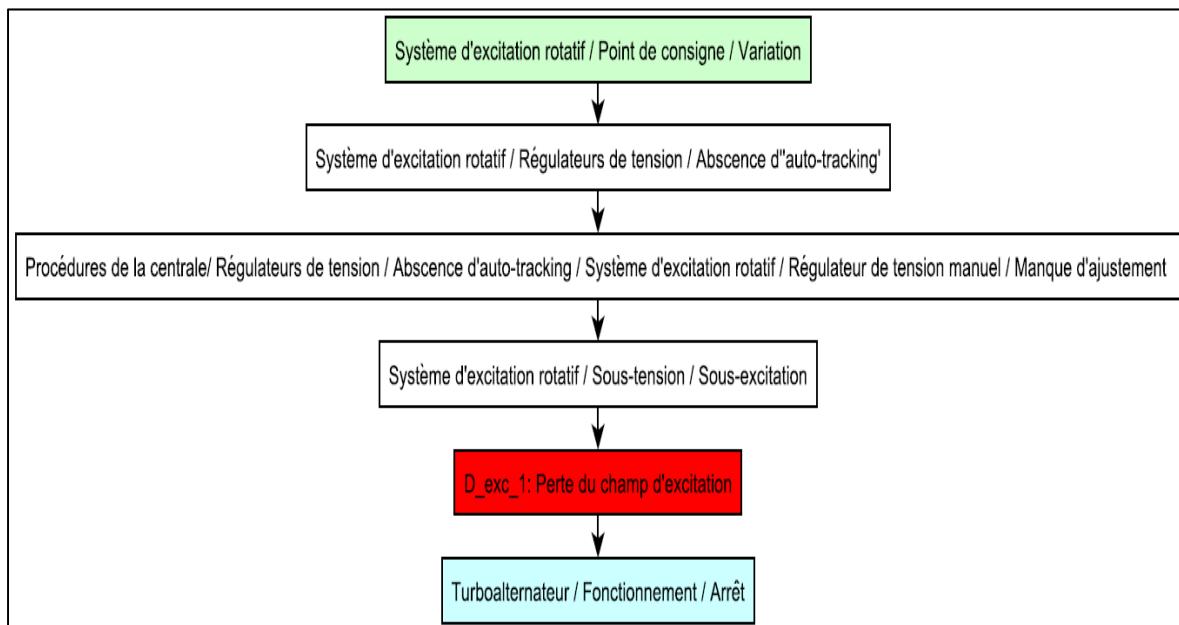


Figure 4.3 Arborescence du mécanisme de défaillance 2 validé

Dans l'explication du lien de cause à effet, Figure 4.3, dans une centrale nucléaire, une validation du point de consigne électrique d'opération n'a pas été contrôlé par le régulateur de tension automatique du système d'excitation. Ceci causa un arrêt complet au niveau du fonctionnement de la génératrice.

Ces causes initiales sont dites de nature ‘Électrique’ et ‘Humain’. Cette absence n'est pas compensée par la régulation de tension manuelle qui doit être assurée comme une des procédures de sécurité. Ce manque d'ajustement, avait produit une sous-tension et l'alimentation en champ d'excitation de l'alternateur hydro-électrique se coupe. Les dégâts se sont propagés jusqu'à l'arrêt immédiat de l'unité.

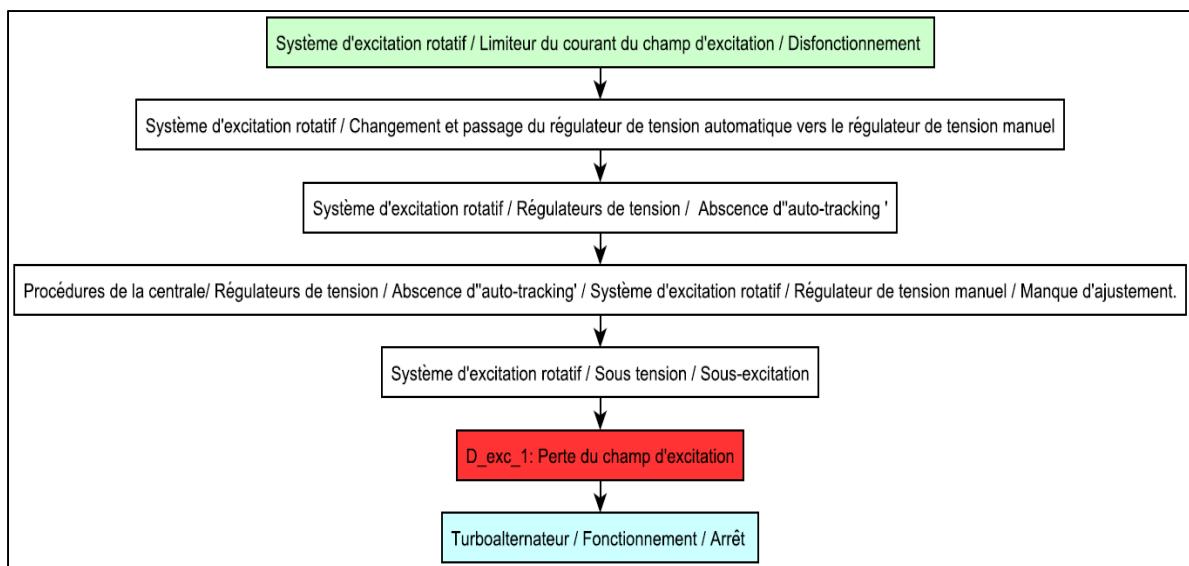


Figure 4.4 Arborescence du mécanisme de défaillance 3 validé

Les causes initiales sont dites de nature ‘Électrique’ et ‘Humain’, Figure 4.4. Dans la succession des faits, une variation du point de consigne électrique d'opération n'a pas été contrôlée par le régulateur de tension automatique du système d'excitation et entraîna une défaillance dans le limiteur de courant de champ. La défaillance touche le fonctionnement du limiteur du courant de champ dans la même centrale nucléaire et cause l'arrêt de l'alternateur.

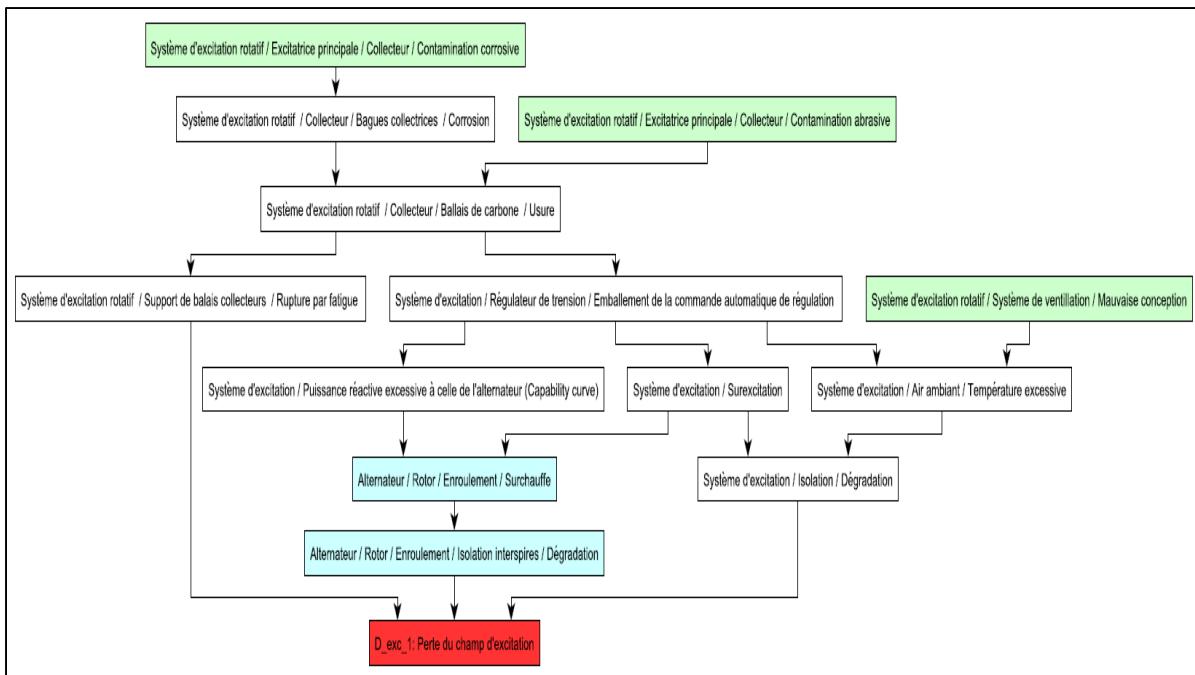


Figure 4.5 Arborescence du mécanisme de défaillance 4 validé

Les causes initiales dans la Figure 4.5 sont dites de nature ‘Électrique’. Dans une centrale hydro-électrique, une petite génératrice de 33 MVA subit des dégâts de corrosion et de mauvaise conception de la ventilation dans son système d’excitation. La perte de champ d’excitation est causée par une contamination corrosive qui peut attaquer le collecteur de l’excitatrice principale. Dans la succession des faits, une accumulation de charge de poussière sur le collecteur causa une rupture par fatigue du support des balais collecteurs et entraîne son usure complète. L’usure des balais de carbone influença le régulateur de tension et mena à l’emballage de sa commande automatique.

Par la suite, une surtension enchaîna une surexcitation avec une puissance réactive excessive, qui se sont produites aux bornes de l’alternateur hydro-électrique menant la surchauffe de l’enroulement rotorique et la dégradation de son isolation inter-spire. Ainsi, le flux magnétique dans l’entrefer, vis-à-vis du pôle endommagé par le manque d’isolation inter-spire, va diminuer. Il peut générer des harmoniques dans les courants statoriques créant de l’échauffement des surfaces polaires sur le rotor et causant ainsi son vieillissement. De plus, la contamination corrosive n’empêcha pas la production d’une contamination abrasive qui

causa la même succession des évènements. La mauvaise conception du système de ventilation du système d'excitation rotatif produisait une température excessive dans l'air ambiant qui dégrada l'isolation des enroulements au niveau de l'excitation.

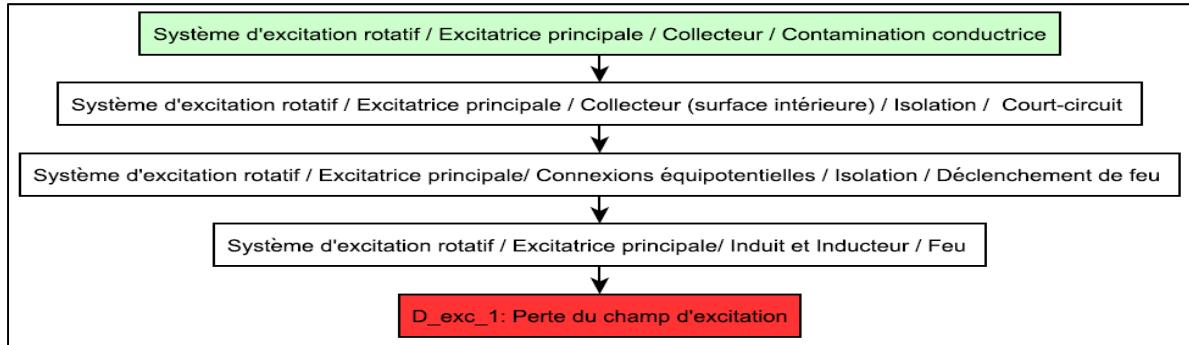


Figure 4.6 Arborescence du mécanisme de défaillance 5 validé

Complémentairement, une contamination conductrice causa un court-circuit et une isolation au niveau de la surface intérieure du collecteur de l'excitatrice principale. La Figure 4.6 expose des causes initiales de nature ‘Électrique’. Ceci déclencha le feu suite au niveau de la surface intérieure du collecteur de l'excitatrice principale du système d'excitation rotatif utilisé et causa la perte du champ d'excitation dans l'alternateur hydro-électrique.

#### **4.3.2 Mécanisme du système d'excitation statique.**

Le mécanisme de dégradation rotor attribuable aux systèmes d'excitation statique est présent dans la Figure 4.7. Dans ce cas, la figure illustre des causes initiales de nature ‘Humain’. Les bobines autour des pôles d'un alternateur hydro-électrique sont alimentées par le système d'excitation qui peuvent avoir des défaillances au niveau d'une de leurs composantes.

Cette section tient compte de la défaillance dans le cas des systèmes d'excitation statique, où une mauvaise utilisation du système provoqua des surtensions.

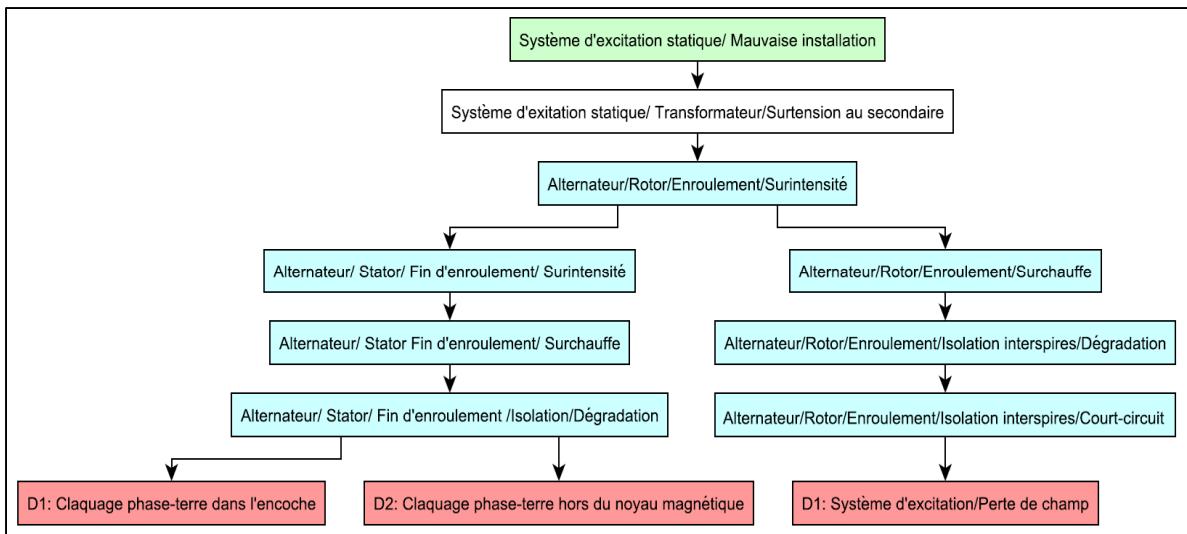


Figure 4.7 Arborescence du mécanisme de défaillance validé

#### 4.4 Conclusion

En conclusion, l'AMDE du système d'excitation a servi à deux fins, soit l'identification des moyens existants de détection des pannes aussi bien que la recherche des causes de défaillance au niveau des sous-systèmes électromécanique.

Cette partie est une étude mécanique, elle a contribué à une première exposition de la revue de l'historique d'exploitation du système d'excitation pour un approfondissement de l'analyse jusqu'au niveau des composants mécanique de chacun des équipements étudiés. Ceci dans le but de juger la pertinence du programme de maintenance préventive en question.

Néanmoins, exposer une étude systématique des conséquences de la défaillance sur les équipements en vue d'obtenir une approche, permet la hiérarchisation du programme de maintenance préventive mis en place.



## **CONCLUSION**

La contribution amenée par cette étude, vise particulièrement le rôle primordial et indispensable du système d'excitation dans le fonctionnement du groupe turbine alternateur dans une centrale hydro-électrique.

Tout d'abord, cette recherche appliquée avec Hydro-Québec et l'Institut de Recherche en Électricité du Québec, traita la modélisation par éléments finis complète de l'alternateur hydro-électrique La Grande 4 et sa validation suivant la norme IEEE 115 en menant les tests à vide et en court-circuit. La méthode des éléments-finis a démontré une fiabilité dans la modélisation et la visualisation du flux magnétique dans l'entrefer contrairement à la méthode analytique.

Ensuite, une revue bibliographique vaste et pointue sur les systèmes d'excitation suivant la norme IEEE 421 exposa ses fonctionnalités, les circuits de protection ainsi que les types trouvés en production. Ici, la contribution majeure de mon étude a permis une observation électromagnétique des modes de fonctionnement de La Grande 4 en sur-excitation et en sous-excitation par rapport au comportement nominal. Cette observation en profondeur a été possible suite à l'utilisation de la méthode des éléments-finis et de son application qui est valorisante en permettant une modélisation détaillée de l'alternateur en modes de fonctionnement défaillants.

Enfin, l'étude électrique et mécanique de La Grande 4 engloba les mécanismes de défaillance relatifs aux différents systèmes d'excitation qui met en évidence le diagnostic du circuit d'excitation complet et de ses composantes.



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- "Approved IEEE Draft Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines (Revision of IEEE 412.1-1986)," *IEEE Approved Std P421.1/D7, Nov 2006*, p. 1, 2007.
- "ESI, Supporting the industry 4.0 transformation – ESI calls for a new paradigm: The Hybrid TwinTM," *The virtual prototyping newsletter*, vol. 67, no. September 2017, 2017
- "IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Part IAcceptance and Performance Testing Part IITest Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis," *IEEE Std 115-2009 (Revision of IEEE Std 115-1995)*, pp. 1-219, 2010
- "Industry 4.0 and the digital twin, Deloitte University Press, 2017," 2017
- A. ADVANTAGE, "Creating a digital twin for a pump ", 2017
- A. B. M. Aguiar, A. Merkouf, C. Hudon, and K. Al-Haddad, "Influence of the Variation of the Input Parameters on the Simulation Results of a Large Hydrogenerator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 1, 2014.
- A. Darabi, C. Tindall, and S. Ferguson, "Finite-element time-step coupled Generator,Load, AVR, and brushless exciter modeling," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 2, 2004.
- A. e. a. Husseiny, "Unavailability of Redundant Diesel Generators in Nuclear Power Plants.," *Reliability Engineering*, vol. 3, 1982
- A. Griffo, R. Wrobel, P. H. Mellor, and J. M. Yon, "Design and Characterization of a Three-Phase Brushless Exciter for Aircraft Starter/Generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, 2013
- A. Mussomeli, A.Parott, B.Umbenhaeur and L. Warsaw 'Digital twins Bringing the physical and digital' 2020
- A. Tessarolo, C. Bassi, and D. Giulivo, "Time-Stepping Finite-Element Analysis of a 14-MVA Salient-Pole Shipboard Alternator for Different Damper Winding Design Solutions," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 6, 2012.
- B. M. Babić, S. D. Milić, and A. Ž. Rakić, "Fault detection algorithm used in a magnetic monitoring system of the hydrogenerator," *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 1, 2017.
- C. J. Azuaje, and V. M. Gomez, "Evaluation of Excitation System Effect on Power Oscillations at Full Load of an 805 MVA Hydrogenerator."

- C. MacDonald, M. Davoudabadi, "Creating a digital twin for a pump, ANSYS advantage," vol. 1, 2017, 2017
- C. S. Byington, M. J. Roemer, and T. Galie, "Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [military aircraft]." vol.6
- Cynthia Moussa; Kamal Al-Haddad; Bachir Kedjar; Arezki Merkhouf; "Insights Into Digital Twin Based on Finite Element Simulation of a Large Hydro Generator" Washington DC, United States of America, IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society
- D. m. Hydroélectrique, *S.E.B.J. Centrale La Grande 4 –Essai de réception en centrale* 1987
- E. ABB, "Brushless Excitation Systems Upgrade," ed: ABB, 2011
- E. Pajuelo, R. Gokaraju, and M. S. Sachdev, "Coordination of overexcitation limiter, field overcurrent protection and generator control."
- G. Rosselet, M. T. Xuan, and J. J. Simond, "Finite Element Model of Electrical Machines Coupled to the Grid Simulation Software," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, 2011
- <http://new.abb.com/news/detail/1097/worlds-first-digital-distribution-transformer>
- <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/#5488440e2e2a>
- <https://www.usine-digitale.fr/editorial/les-avions-auront-bientot-leur-jumeau-numerique.N336829>
- I. R. E. Q. H.-Q. Production, "Pérennité des systèmes d'excitation, Centrales hydroélectriques de la VPEEP," I.R.E.Q.2011..
- J. Akiror, P. Pillay, and A. Merkhouf, "Challenges in Modeling of Large Synchronous Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. PP, no. 99, 2017
- J. C. Akiror, P. Pillay, and A. Merkhouf, "Effect of Saturation on Rotational Flux Distribution in Hydro Generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 4, 2016.
- K.Slimani, "Besoins et contraintes d'exploitation de l'unité d'affaires concernant les systèmes d'excitation des alternateurs ." I.R.E.Q., Hydro-Québec2005.
- K.Slimani, "Calcul de la valeur économique pour la solution qui utilise des excitatrices à convertisseur électronique tournant.," I.R.E.Q., Hydro-Québec 2005.
- K.Slimani, "État de l'art sur les systèmes de production d'énergie électrique utilisant des alternateurs , " I.R.E.Q., Hyro-Québec2005.
- L. Voulligny, C. Hudon, and D. N. Nguyen, "Design of MIDA, a Web-Based Diagnostic Application for Hydroelectric Generators."

- M. A. Khalf, R. Wamkeue, and D. Aguglia, "Finite element approach for performances prediction of a small synchronous generator using ANSYS software."
- M. A. R. Kucera, M. Benson, , "The augmented digital twin – Combining physical and virtual data to unlock the value of IoT," <http://info.exosite.com/augmented-digital-twin>, 2017
- M. G. McArdle and D. J. Morrow, "Noninvasive detection of brushless exciter rotating diode failure," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, pp. 378-383, 2004.
- M. G. Schwabacher, Kai "A Survey of Artificial Intelligence for Prognostics " *Aaai fall symposium*, 2007.
- P. Butros, "simulation of rotating brushless AC excitation system with controlled thyristor bridge rectifier for hydropower generators ", UPPSALA Universitet 2011.
- P. Maussion, "Fine Power Alternator Modelling For Diagnosis Purposes by Means of Flux2D\Matlab Co-simulation," 2016.
- R. C. Schaefer, "Applying static excitation systems," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no. 6, 1998.
- S. E. Dallas, A. N. Safacas, an d J. C. Kappatou, "Comparison of the hydrogenerator behavior during a field short-circuit in case with and without PI-controller using FEM."
- S. Murty, G. K. Dubey, and R. M. K. Sinha, "Fault Diagnosis in Three-Phase Thyristor Converters Using Microprocessor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 6, 1984.
- S. P. Hirschberg, U., "Common-Cause Failure Data: Experience from Diesel Generator Studies," *Nuclear safety* vol. 26, no. 3, 1985.
- S. Rosado, X. Ma, G. Francis, F. Wang, and D. Boroyevich, "Model-Based Digital Generator Control Unit for a Variable Frequency Synchronous Generator With Brushless Exciter," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, 2008.
- S. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles," in Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin, 2017
- S.S. Moosavi, A. Djerdir, Y. Ait-Amirat and D. Arab "Artificial neural network-based diagnosis in the AC-DC converter of the power supply of series hybrid electric vehicle" IET Electrical Systems in Transportation, volume 6, Issue 2, June 2016.
- V. Ivanov, M. Brojboiu,S. Ivanov and F. Ocoleanu "Short circuits faults diagnosis for the rectifier fased on the analytic model method"2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, 2016.

W. Na, "A feedforward controller for a brushless excitation system during the diode open circuit fault operation," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 2011.

W. S. Im, J. M. Kim, D. C. Lee, and K. B. Lee, "Diagnosis and fault-tolerant control of 3-phase AC-DC PWM converter system."

[www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017](http://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017)

[www.idc.com/idcfuturescapes2016](http://www.idc.com/idcfuturescapes2016)

[www.zdnet.fr/actualites/industrie-vers-une-utilisation-massive-des-jumeaux-numeriques-en-passant-au-digital-39857684.htm](http://www.zdnet.fr/actualites/industrie-vers-une-utilisation-massive-des-jumeaux-numeriques-en-passant-au-digital-39857684.htm)," 2017

X. Zhu, M. Cheng, W. Zhao, C. Liu, and K. T. Chau, "A Transient Cosimulation Approach to Performance Analysis of Hybrid Excited Doubly Salient Machine Considering Indirect Field-Circuit Coupling," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 6, 2007.

Y. Reyraud, "De la fiabilité à la maintenance des groupes de secours dans les centrales nucléaires," *Entropie*, vol. 128, 1986L

Y. S. Murty, G. K. Dubey, and R. M. K. Sinha, "Fault Diagnosis in Three-Phase Thyristor Converters Using Microprocessor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 6, 1984.