

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉTUDE DU COUPLAGE ENTRE
LES GROUPES TURBINE-ALTERNATEUR
ET
LES PASSAGES HYDRAULIQUES
– APPROCHE GDA –

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
SORIN - IOAN LUPA

JANVIER 2021

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE - CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL
(M. Sc. A.)

Direction de recherche :

Georges Abdul-Nour, directeur de recherche, Ph.D.

UQTR

Martin Gagnon, codirecteur de recherche, Ph.D.

Hydro-Québec

Jury d'évaluation

Georges Abdul-Nour, Ph.D.

UQTR

Dragan Komljenovic

Hydro-Québec

Martin Gagnon, Ph.D.

Hydro-Québec

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance et remercier mon directeur de recherche Monsieur Georges Abdul-Nour, Ph.D. professeur titulaire de la chaire GDA à l'UQTR, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont alimenté ma réflexion tout au long de mon travail.

Je tiens à remercier aussi mes codirecteurs, Monsieur François Gauthier, Ph.D. Professeur et Directeur du Département de génie industriel à l'UQTR et Monsieur Martin Gagnon, Ph.D. chercheur à l'institut IREQ d'Hydro-Québec pour leur implication, collaboration et recommandations.

Un grand merci à mes collègues d'Hydro-Québec qui ont rendu possible le déroulement des essais dans les centrales et qui ont oublié, pendant ces instants, que dans la vie de tous les jours j'étais celui qui les agaçais avec d'innombrables normes, plus urgentes et plus importantes les unes que les autres.

Je remercie aussi les collaborateurs d'IREQ qui, de près ou de loin, ont contribué au succès de ma démarche.

SOMMAIRE

Le présent travail se concentre sur les paramètres qui induisent des surpressions dans les passages hydrauliques des centrales hydroélectriques. Le coup de bélier influence le cycle de vie des passages hydrauliques et peut même provoquer une défaillance structurelle soudaine. L'intention de la présente recherche est d'étudier les facteurs d'influence des surpressions lors des rejets de charge et d'autres régimes transitoires. L'objectif principal de cette approche est d'évaluer les principaux paramètres associés au phénomène de coup de bélier. Les approches les plus récentes ont été analysées à travers une revue de littérature. Plusieurs campagnes expérimentales ont été réalisées sur 24 configurations hydroélectriques du parc d'Hydro-Québec, équipées de différents types de turbines hydrauliques et de passages hydrauliques associés. Le principal paramètre contrôlé au cours de ces expériences a été la vitesse de fermeture rapide des directrices. Les résultats de l'analyse des données expérimentales montrent que la valeur de la surpression est également influencée par d'autres facteurs qui doivent être pris en compte dans le développement futur des modèles analytiques. En conclusion, une compréhension documentée et approfondie du phénomène de coup de bélier permettra d'optimiser la conception des équipements, de recommander des paramètres de fonctionnement appropriés pour augmenter la durée de vie des équipements et éviter les accidents catastrophiques.

TABLE DE MATIÈRE

| | |
|---|------|
| REMERCIEMENTS | iv |
| SOMMAIRE | v |
| TABLE DE MATIÈRE | vi |
| LISTE DES FIGURES | viii |
| LISTE DES ACRONYMES | x |
| CHAPITRE 1 - INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 Mise en contexte | 1 |
| 1.2 Problématique de la recherche | 4 |
| 1.3 Question de la recherche | 5 |
| 1.4 Objectif principal | 6 |
| CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE | 9 |
| 2.1. Préambule | 9 |
| 2.2. Les premières études : 1 ^{re} moitié du XX ^e siècle | 11 |
| 2.3. Les théories des temps modernes : 2 ^e moitié du XX ^e siècle | 14 |
| 2.4. Les modélisations récentes | 17 |
| 2.5. Matrice de la revue de littérature | 23 |
| CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE | 24 |
| 3.1. Liste des variables | 24 |
| 3.2. Modèle de recherche | 26 |
| 3.3. Feuille de route d'un projet de recherche | 31 |
| 3.4. Méthodologie de recherche | 32 |
| CHAPITRE 4 - RÉSULTATS | 36 |
| 4.1. Tendances de la surpression en fonction du type de GTA | 41 |
| 4.2. Impact du gradient tBAF de la première pente | 46 |
| 4.3. Impact de la deuxième pente de fermeture des directrices | 51 |
| 4.4. Surpression en fermeture de la marche à vide | 53 |
| 4.5. Surpression en régulation de vitesse et fermeture | 54 |
| 4.6. Analyse temporelle des interactions entre les facteurs | 56 |

| | |
|---|----|
| CHAPITRE 5 - DISCUSSIONS | 60 |
| CHAPITRE 6 - CONCLUSIONS | 63 |
| CHAPITRE 7 - RECOMMANDATIONS | 67 |
| LISTE DES RÉFÉRENCES..... | 72 |
| APPENDICE A <i>MATRICE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE</i> | 74 |
| APPENDICE B <i>NOTIONS TECHNIQUES SUR PHYDR, GTA ET LA TENUE DES ESSAIS</i> | 77 |
| APPENDICE C <i>Article publié à WCEAM 2021</i> | 88 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Exemple d'un article dans la Matrice de la revue de littérature | 23 |
| Figure 2 : Tableau des variables indépendantes | 24 |
| Figure 3 : Diagramme Ishikawa | 25 |
| Figure 4 : Modèle de recherche | 26 |
| Figure 5 : Interrelations entre les variables indépendantes..... | 29 |
| Figure 6 : Feuille de route d'un projet de recherche..... | 32 |
| Figure 7 : [%dP] en fonction du [%WG], hélices de basse chute, centrales A et B (2016-2018)..... | 42 |
| Figure 8 : [%dP] en fonction du [%WG], Kaplan de basse chute, centrales N à P (2016-2017)..... | 43 |
| Figure 9 : [%dP] en fonction du [%WG], saxo de basse chute, centrales L et M (2017-2019) | 43 |
| Figure 10 : [%dP] en fonction du [%WG], Francis de basse chute, centrales F à K (2014-2015) | 44 |
| Figure 11 : [%dP] en fonction du [%WG], Francis de basse chute, centrales C à E (2012-2018)..... | 44 |
| Figure 12 : [%dP] en fonction du [%WG], Francis de chute moyenne, centrales Q à T (2012-2018)..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figure 13 : [%dP] en fonction du [%WG], Francis de haute chute, centrales V à Z (2013-2019) | 45 |
| Figure 14 : Variation des [%dP] pour différentes tBAF appliqués à l'hélice de la centrale A (2018) | 47 |
| Figure 15 : Variation des [%dP] pour différentes tBAF appliqués à une Francis de la centrale E (2018)..... | 47 |
| Figure 16 : Variation des [%dP] pour différentes tBAF appliqués à une Kaplan, de la centrale P (2017) | 48 |
| Figure 17 : Mise à l'échelle de l'évolution générale des surpressions des [%dP] en fonction du %WG pour différents tBAF..... | 50 |
| Figure 18 : Influence de la seconde pente pour différents tBAF d'une Kaplan (2017) | 52 |
| Figure 19 : Pic de surpression de la marche-à-vide dans la centrale électrique Y (2016) | 54 |
| Figure 20 : Évolution des pressions dans le temps lors d'une baisse de charge pour une Francis dans la centrale Y (2019)..... | 55 |
| Figure 21 : Paramètres enregistrés lors d'un rejet de charge, d'une Francis de la centrale Y (2019)..... | 58 |
| Figure 22 : Grille des mesures d'amélioration | 71 |

LISTE DES ACRONYMES

| | |
|---------|---|
| %dP | surpressions d'essais maximales normalisées |
| %WG | position des directrices |
| 1D | modélisation unifilaire |
| 3D | modélisation spatiale |
| Ai | article i de la revue de littérature |
| AMD | Analyse des Modes de Défaillance |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers |
| BR-USDI | Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior |
| CoSM | position des servomoteurs de vannage |
| DOE | Design of Experiments (plan d'expériences) |
| GDA | Gestion des Actifs |
| GIMC | Gestion Intégrée de la Maintenance Conditionnelle |
| GTA | Groups Turbine-Alternateur hydraulique |
| HCF | High Cycle Fatigue (cycles de haute fréquence) |
| HQ | Hydro-Québec |
| IEA | International Energy Agency |
| IREQ | Institut de Recherche d'Hydro-Québec |
| mce | mètres de colonne d'eau |
| MW | puissance du groupe |
| LCF | Low Cycle Fatigue (cycles de basse fréquence) |
| PHYDR | passages hydrauliques des turbines hydroélectriques |

| | |
|--------------|---|
| Pref | pression de référence (lorsque les directrices sont fermées) |
| PrEnBa | pression mesurée à l'entrée de la bâche spirale |
| PrPoBa | pression mesurée à la porte de bâche |
| PrDist | pression mesurée à l'avant-distributeur |
| PrPoAspiHaut | pression mesurée en haut de la porte de l'aspirateur |
| PrPoAspiBas | pression mesurée en bas de la porte de l'aspirateur |
| RFP | Régulation du réseau en Fréquence et en Puissance |
| rpm | vitesse de rotation du groupe |
| tBAF | temps de fermeture des directrices sur la pente rapide (en secondes pour une course complète de 100% à 0%, mesurées en eau morte) |
| ti | différents temps "i" de fermeture rapide des directrices |
| UQTR | Université du Québec à Trois-Rivières |
| OECD | Organization for Economic Cooperation and Development |
| Vi | Variables indépendantes |
| Vi j | Variable indépendante "j" |
| WCEAM | World Congress on Engineering Asset Management |

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Dans le contexte énergétique actuel, les producteurs d'électricité s'orientent vers de nouvelles énergies renouvelables. Par conséquent, des panneaux photovoltaïques, des turbines éoliennes, des centrales solaires thermiques, etc., sont introduits de plus en plus dans les réseaux nationaux ainsi que sur de micros réseaux locaux. Ces ressources sont pratiquement inépuisables et l'impact de l'exploitation sur l'environnement est presque nul. Selon le plus récent rapport World Energy Outlook de l'OECD/IEA (2020), il y a une volonté et une stratégie à long terme, développée par les facteurs de décision, afin d'exploiter ces ressources.

Du point de vue de la présente démarche de recherche, le principal désavantage de ces technologies est relié au manque de flexibilité, à une disponibilité arbitraire et à l'impossibilité de stockage de ces ressources. Par conséquent, des Groupes Turbine - Alternateur (notation GTA pour le mémoire) sont nécessaires pour régulariser et équilibrer le réseau. Dans le nouveau contexte, les exigences du réseau ont changé de façon significative, donc les GTA sont de plus en plus sollicités pour des régimes d'exploitation plus sévères, tels qu'évoqués par Dreyer, Nicolet, Gaspoz, Biner, Rey-Mermet, Saillen, et Boulicaut (2019). La conséquence du nouveau mode d'exploitation des GTA en régimes transitoires est une amplification des sollicitations, ce qui affecte les

équipements, mais surtout, accélère la dégradation des passages hydrauliques des centrales hydroélectriques (notation PHYDR pour le mémoire).

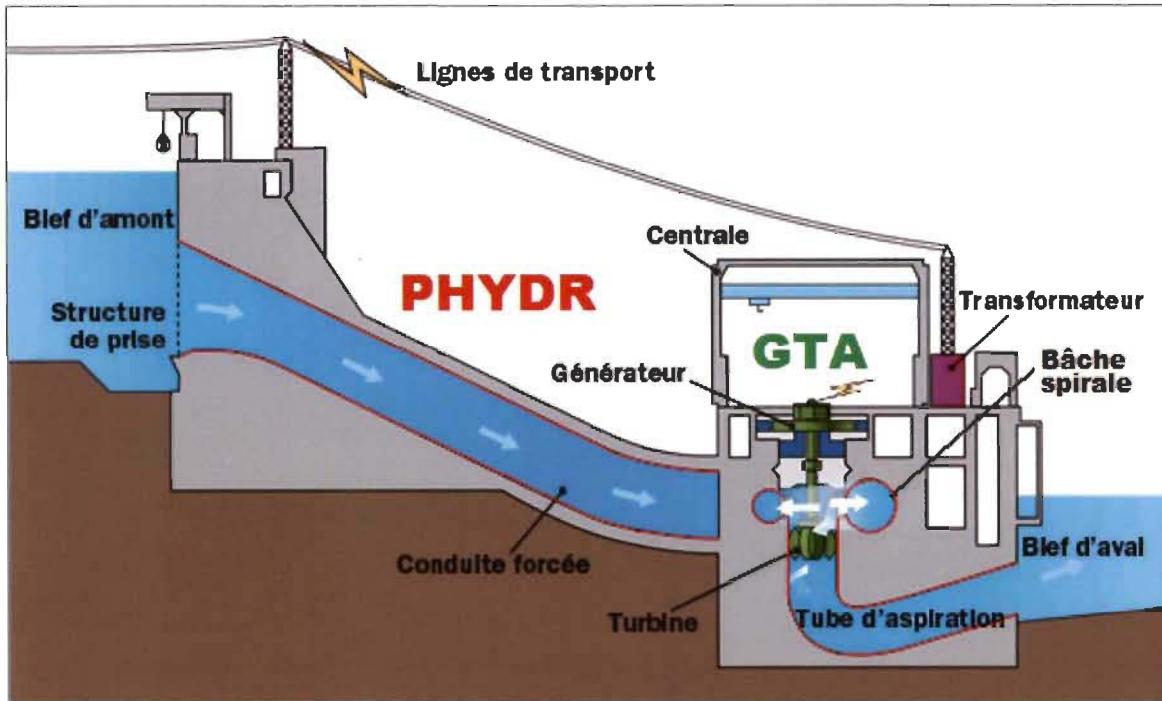


Schéma d'une centrale hydroélectrique : GTA en vert, PHYDR en rouge

[image de : Énergie NB Power Hydro. (2021).

<https://www.nbpower.com/fr/about-us/learning/learn-about-electricity/hydro>]

– pour plus de détails voir **Appendice B**

Dans la perspective de la GESTION D'ACTIFS, dans le contexte de sursollicitation, pour mieux comprendre l'effort il faudrait tenir compte du stress supplémentaire occasionné par le nouveau mode d'exploitation imposé aux GTA. Dans ce sens, l'identification des besoins réels des actifs permettra de recommander des paramètres de fonctionnement optimaux. Qu'il s'agisse d'un rééquipement ou d'une augmentation de puissance d'un groupe, les études d'ingénierie et de rentabilité se concentrent surtout sur les GTA qui sont générateurs directs de revenus et très peu sur les PHYDR. De plus, il est

important de considérer que la durée de vie des PHYDR est bien souvent plus grande que celle des GTA. Dans ce contexte, le même PHYDR peut voir plusieurs remplacements de GTA et il se peut que la fin de la vie utile du PHYDR arrive avant celle du dernier GTA installé. Donc, le PHYDR est mis à risque pour un certain temps. D'autre part, la défaillance du PHYDR occasionne des grandes dépenses sur le plan d'affaires et peut coûter aussi des vies humaines. L'influence des régimes transitoires (notamment lors de l'arrêt d'urgence) qui se produisent lors des différentes conditions de fonctionnement d'un GTA a été mesurée. En particulier, l'impact des contraintes induites par l'arrêt d'urgence sur le PHYDR est ciblé. Par conséquent, il est nécessaire d'estimer les valeurs des contraintes extrêmes induites dans la structure de plusieurs PHYDR avec des caractéristiques différentes (par exemple : passage hydraulique long/court, passage externe/enterré, chute basse/haute, structure en béton/soudé et autres). Le comportement des différents types de turbines hydrauliques (par exemple Francis, Kaplan, hélice) a été étudié expérimentalement pendant les séquences d'arrêt d'urgence lors des rejets de charge, la fluctuation de la charge, la procédure de démarrage-arrêt et le voyage ou le fonctionnement en zones transitoires. Les mesures expérimentales réalisées lors des rejets de charges sur plusieurs GTA ont été analysées. Certains cas particuliers survenus pendant les essais, ainsi qu'en fonctionnement normal ont également été pris en compte. L'influence de plusieurs paramètres ayant un impact significatif sur la surpression induite, lors

du phénomène de coup de bâlier, pour formaliser leur influence a été mise en évidence. Le principal paramètre contrôlé au cours de ces expériences fut la vitesse de fermeture rapide des directrices. Cependant, certains facteurs spéciaux, qui ne sont généralement pas pris en compte ou insuffisamment documentés par les chercheurs précédents, ont été étudiés. Par exemple, ont été retenus à l'étude : la fermeture d'urgence par une deuxième pente, la fluctuation de pression à l'intérieur du tube d'aspiration, la surpression se produisant à charge partielle ou encore lors du fonctionnement avec de faibles débits. En conclusion, une compréhension documentée et approfondie du phénomène de coup de bâlier permettra d'optimiser la conception des équipements, de recommander des paramètres de fonctionnement appropriés pour augmenter la durée de vie des équipements et éviter les accidents catastrophiques. En analysant les charges extrêmes dans les PHYDR, nous voulons guider l'évolution de modèles et de simulations numériques adaptés aux transitoires. Ces résultats nous permettront de sélectionner le modèle analytique approprié pour chaque unité hydroélectrique spécifique, conduisant à des recommandations pour leur conception et leur exploitation.

1.2 Problématique de la recherche

Le coup de bâlier est l'un des principaux facteurs d'influence sur les PHYDR, car il peut diminuer la durée de vie, voir même provoquer une défaillance structurelle soudaine. Le service extrême des GTA produit des coups de bâlier

et des fluctuations de pression qui conduisent vers la dégradation prématuée du PHYDR. Dreyer, Nicolet, Gaspoz, Biner, Rey-Mermet, Saillen, et Boulicaut (2019) notent qu'il est essentiel de connaître et estimer les chargements supplémentaires des PHYDR occasionnés par l'opération des GTA dans les zones transitoires.

1.3 Question de la recherche

La Question principale qui se pose vis-à-vis la problématique identifiée serait : quelle est l'influence sur la dégradation des PHYDR des sollicitations induites par l'exploitation des GTA en régimes transitoires, que ce soit pour mode opératoire normal ou accidentel? Pour répondre à cette question, dans un premier temps, les sollicitations extrêmes seront identifiées, ensuite par l'intermédiaire des effets occasionnés nous allons faire le lien avec la détérioration de l'équipement.

Quelques **questions spécifiques** vont aider afin de trouver la réponse à la question principale de la recherche :

- ✓ Quelles sont les sollicitations extrêmes sur les PHYDR lors des :
 - Séquences de protection d'urgence des GTA, telles que les rejets de charge et les fermetures d'urgence?
 - Manœuvres du GTA requises pour l'exploitation en pointe, notamment l'utilisation des temps rapides lors des séquences de démarrage et d'arrêt du groupe?

- Rampes requises pour la régulation sur changements de consigne en exploitation?
 - Passages, voir même exploitation, dans les zones avec turbulences?
- ✓ Quelle est la participation de chacune des sollicitations identifiées ici haut dans la dégradation du PHYDR?
- ✓ Quelles sont les particularités des sollicitations pour différents types de GTA (Francis, Kaplan, Hélice) et différents types de PHYDR (longue/courte, creusée/externe, basse/haute chute, etc.).

1.4 Objectif principal

Dans le contexte décrit, l'**objectif principal** sera d'identifier les facteurs qui contribuent au phénomène de coup de bélier et d'établir leur influence, afin de dresser, par l'analyse des charges extrêmes, un portrait le plus fidèle à la réalité de l'interaction du GTA avec le PHYDR et des conséquences qui en découlent. Ensuite, dans la lumière GDA et basée sur les conclusions des régimes étudiés, l'étude se propose de formaliser le lien entre les différents modes opératoires du GTA pour estimer l'impact sur le processus de vieillissement des PHYDR. Les considérations de base ont été :

- ✓ Une exploitation du GTA plus extrême entraînera des coups de bélier supplémentaires et des fluctuations de pression, ce qui entraînera une dégradation prématuée de la structure du PHYDR.

- ✓ Les chargements cycliques, en régime transitoire, ont un impact majeur sur la fiabilité et la disponibilité des équipements.
- ✓ La surpression est un problème de sécurité en ce qui concerne le respect de la pression maximale admissible.

Le travail s'inscrit dans le cadre de référence de la gestion des actifs surtout dans la gestion et le contrôle de risque sur le cycle de vie active de l'ensemble GTA et PHYDR: de l'acquisition (critères de conception), en passant par les conditions d'opération (régimes d'exploitation) et en considérant la maintenance (périodique ou corrective). Dans la pratique, nous avons constaté que la mise en service avec les paramètres d'ajustement appropriés d'un GTA évite des sollicitations en surpression par charges extrêmes ou en fatigue par transitoires, prévient les accidents et permet un service sécuritaire du PHYDR. Par tous ces aspects, la mise en service se constitue le garant d'une durée de vie adéquate pour les actifs et par conséquent le producteur d'énergie doit avoir comme objectif stratégique la sélection et l'ajustement optimal des paramètres critiques.

Ainsi, les recommandations issues de notre démarche se proposent de sensibiliser les facteurs décisionnels, d'influencer les règlements afin d'orienter les décisions pour une gestion efficace des actifs :

- ✓ Pour augmenter la longévité de l'actif;
- ✓ Garantir la sécurité des installations sur le long terme.

Comme **objectifs secondaires** il serait souhaitable de créer les prémisses et identifier les lignes directrices pour avancer :

- ✓ La méthode AMD des PHYDR;
- ✓ Les modélisations 3D / 1D (Projet THAUR d'IREQ);
- ✓ Les simulations numériques des transitoires (projet THAUR d'IREQ);
- ✓ Les modèles adaptés des PHYDR (projet JUMEAUX NUMÉRIQUES d'IREQ);
- ✓ La prise de décision dans un contexte pluridisciplinaire (projet Pilote « Avis des Experts » d'IREQ).

La dimension historique sera considérée lors de la démarche, en commençant par les théories utilisées à la conception du début du siècle et allant jusqu'aux modèles et simulations actuels.

Le travail présent se propose de contribuer aux recherches sur les sollicitations extrêmes et, par l'analyse des résultats obtenus, d'appuyer l'avancement des modèles du domaine et des simulations numériques pour les transitoires (SIMSEN par exemple).

Cette approche permettra de choisir et d'adapter un mode de fonctionnement approprié pour un GTA spécifique et effectuer des recommandations pour la conception et l'industrie.

CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE

2.1. Préambule

Les approches ont été analysées à travers une revue de littérature afin de documenter les paramètres liés au phénomène de coup de bâlier et de préparer la méthodologie pour valider les résultats. Dans la littérature, la théorie du coup de bâlier est bien documentée, à partir des théories simplistes utilisées en conception au début du siècle, jusqu'aux modèles et simulations numériques actuels. Plus récemment, à l'opposé d'une perte de charge classique constante, des modèles dynamiques du coup de bâlier sont basés sur le concept de similitude du GTA avec un orifice variable et considèrent que la roue en survitesse agit comme un orifice dynamique.

Le **concept** considéré pour la revue de littérature est la longévité des PHYDR et la **mesure des performances** se fera par les efforts des surpressions engendrés par l'exploitation des GTA et leur impact.

La revue de littérature a comme objectif de soutenir l'intention de l'analyse présente et d'aller plus loin en identifiant les facteurs qui contribuent au phénomène et d'en formaliser leur influence. Dans ce sens, le résultat de la revue est la liste des variables indépendantes en lien avec la durée de vie des PHYDR retenue comme variable dépendante.

Les mots clefs utilisés :

- ✓ Régime transitoire turbine (turbine transient);
- ✓ Délestages (load rejection);
- ✓ Mise en service turbine (turbine commissioning);
- ✓ Coup de bâlier (water hammer);
- ✓ Modélisation turbine (runner model);
- ✓ Conduite d'amenée (penstock);
- ✓ Bâche spirale (spiral case).

Il y a des préoccupations reliées au coup de bâlier depuis l'Antiquité, avant même que le phénomène n'ait un nom. Les premières approches remontent au 1^{er} siècle av. J.-C., quand Marcus Vitruvius Pollio (traduit par Morgan M.H., 1914) mentionnait dans son travail « Les dix livres sur l'architecture » l'impact du coup de bâlier dans les tuyaux en plomb ou en roche composant le réseau d'eau publique et recommandait aussi des mesures à prendre pour réduire les dommages. Par la suite, quelques approches occasionnelles seront traitées, mais sans tenir compte des particularités du parcours d'eau, non plus de l'interaction avec l'organe qui coupe le débit. Puis, avec l'arrivée des premiers accidents majeurs dus aux coups de bâlier, les inquiétudes et les préoccupations dans le domaine se sont multipliées, surtout dans l'industrie hydroélectrique.

Afin de marquer le progrès des recherches et le développement des modèles, les faits saillants des articles scientifiques, qui ont fait l'objet de la revue de littérature, sont présentés par la suite en trois sous-chapitres distincts organisés sur l'évolution historique de la théorie dans le domaine et la chronologie des contributions. À la fin du mémoire, les articles analysés sont énumérés dans le chapitre Références.

2.2. Les premières études : 1^{re} moitié du XX^e siècle

Au début du siècle, Bouchayer (1902; 1911) et Le Comte de Sparr (1919), entre autres, énoncent des théories simplistes utilisées à l'époque pour la conception des passages hydrauliques. Les premiers accidents majeurs dus aux coups de bâlier stimulent les recherches et les mesures d'atténuation pour les centrales hydroélectriques. Le profil particulier du PHYDR ne fait pas encore partie des facteurs d'influence, les particularités pour les passages en béton ne sont pas prises en compte. À cette époque, les analyses ne portent que sur la valeur d'un temps de fermeture sur une seule pente maximale admise pour les équipements pouvant couper le débit. Cependant, nous commençons à avoir des enregistrements de pression, même si malheureusement ce sont avec des appareils primitifs et peu performants.

Bouchayer (1902) fait une revue des premières conduites forcées et rappelle les principes de calcul. Les facteurs d'influence sur la durée de vie des PHYDR, identifiés après les premiers 65 ans d'expérience avec les conduites forcées, restent dans le domaine de la résistance des matériaux classique.

Selon l'auteur, le domaine serait bien maîtrisé et ne nécessiterait que des formules plutôt simples. En 1902, l'abord de la conception des PHYDR est plutôt simpliste. Toutes les formules sont mentionnées comme « très simples ». Le temps de fermeture des directrices GTA, qui un facteur critique/majeur pour le coup de bâlier, est calculé par une formule « très simple ». Il n'y a pas de calcul du trajet hydraulique PHYDR, simplement du débit pour l'épaisseur de la paroi. À l'époque, il y avait plutôt de grands consommateurs qui pouvaient facilement provoquer des rejets de charge dans les réseaux isolés existants. La dégradation de la pression de conception d'origine dans le temps n'est influencée que par oxydation et de plus, depuis 20 ans, ce phénomène serait sous contrôle / sans inquiétude (repeindre aux 3-4 ans). L'impact des sollicitations cycliques ou par fatigue sur le PHYDR n'est pas du tout pris en compte ce qui était une lacune à l'époque.

Une décennie plus tard, l'auteur (Bouchayer, 1911) revient avec un suivi de son article publié en 1902 et réitère que l'ensemble des facteurs qui influencent la fiabilité des PHYDR doit être considéré à la conception. En 1911, l'abord est moins simpliste, les formules en référence sont plus élaborées, les critères de conception, les matériaux, les méthodes de fabrication et les essais ont un rôle

plus important dans la durée de vie du PHYDR. Les enregistrements obtenus avec les enregistreurs recommandés par le passé ont été très utiles pour identifier les causes de ruptures de conduites.

Après la Première Guerre mondiale, Le Comte de Sparre (1919) fait un survol des avancements dans le domaine de l'hydroélectricité en Europe. Il introduit la notion de loi de fermeture non linéaire pour le vannage et présente la validation expérimentale des théories et des calculs. Il considère aussi l'épaisseur variable de la paroi d'une conduite et les phénomènes de résonance pendant l'écoulement sont mentionnés.

Au Canada, suite à l'accident survenu en septembre 1912 au Québec à la centrale Shawinigan 1 de Water & Power (rupture d'une conduite de 3 mètres de diamètre, sous une chute de 44 mètres de colonne d'eau et causant la mort d'un employé), une commission de scientifiques et d'ingénieurs a fait l'état de l'art en Amérique du Nord (Doolittle et Davis, 1927). Les membres du comité ont rappelé les hypothèses et les principes de calcul pour le coup de bâlier basé sur la théorie d'Allievi qui venait juste d'être publié en 1921. Ils ont fait une revue des conduites forcées en service en soulignant l'importance de la conception adéquate de la conduite forcée, surtout concernant le choix de la pression de conception et l'ajout des équipements de protection, tel que les soupapes de surpression. Dans le contexte où à l'époque les temps de fermeture des directrices communément utilisées étaient de 5 secondes / 100 % de vannage, voir même 3 secondes (!), ils ont mis l'accent sur le fait qu'en délestage le GTA

est le principal facteur qui produit la sollicitation par coup de bélier sur le PHYDR. On note que les temps communément utilisés pour la fermeture sont plutôt de l'ordre de grandeur de 7 secondes et puisque la surpression monte de façon exponentielle avec la diminution de ce temps, avec 3 secondes on dépasserait facilement la pression de conception d'un PHYDR.

2.3. Les théories des temps modernes : 2^e moitié du XX^e siècle

À cette époque, les premiers modèles et simulations numériques classiques du coup de bélier ont été développés. Le profil spécifique du PHYDR et les passages en béton sont pris en compte. De nombreux dispositifs et méthodes sont proposés pour atténuer les effets de coup de bélier. Les analyses incluent des recommandations pour le temps de fermeture des directrices. Les enregistrements de pression sont plus précis et l'arrivée de l'électronique et des automates programmables facilite le traitement du signal.

En utilisant les équations de base de la mécanique des fluides applicables pour les PHYDR des GTA et les limitations des scénarios appropriés, Parmakian (1963) synthétise et développe la théorie qui entoure le phénomène de coup de bélier dans les PHYDR. Durant ces années, les théories et les équations se retrouvent plus raffinées, les hypothèses sont bien précisées et les conditions limite mieux définies. On voit apparaître une préoccupation pour les sollicitations cycliques et la fatigue qui commence à concerter les concepteurs.

Des équipements et des mesures d'atténuation des coups de bélier sont proposés (cheminée d'équilibre, chambre ou accumulateurs à air).

Les lacunes saisies à l'époque seraient que :

- ✓ L'impact des sollicitations cycliques ou par fatigue n'est pas du tout pris en compte;
- ✓ La modélisation de la coupure par les directrices est simpliste;
- ✓ L'influence des temps de fermeture sur la survitesse du GTA n'est pas considérée.

Aux États-Unis, le Bureau of Reclamation (BR - USDI, 1977) fait la synthèse sur 40 ans d'expérience des critères de conception des passages hydrauliques en acier soudé. Principalement les PHYDR qui équipent les GTA doivent remplir simultanément les deux fonctions de base :

- ✓ Assurer un débit et un trajet hydraulique optimal;
- ✓ Répondre aux sollicitations mécaniques lors de l'opération.

Le Bureau stipule que les PHYDR doivent être sécuritaires en tout temps, sur tous les chargements possibles afin de prévenir les défaillances et demandes, que ceux qui sont construits en acier soudé soient en accord avec le Code ASME Section VIII.

Un abord remarquable de la problématique des sollicitations a été fait par Selz (1986) qui a rappelé quels étaient à l'époque les concepts importants encadrant la requalification des vaisseaux sous pression selon les stratégies et méthodes du code ASME. Il constate qu'il n'y avait pas de règles spécifiques

en place et que des méthodes devaient être développées, basées sur les normes existantes, par les concepteurs. Selon lui, les concepteurs doivent être préparés, car il existe de fortes incitations économiques et de sécurité pour la requalification des vaisseaux sous pression. En particulier pour la requalification des valeurs inférieures de la pression admissible d'origine et de fin de la durée de vie utile des équipements. Dans un tel cas, les coûts de requalification se situerait entre 10 et 15 % du coût de remplacement. Quant à la conception des PHYDR, nombreux producteurs demandent aux fournisseurs que les équipements soient conformes aux requis du code ASME. Cette demande regarde aussi bien la conception initiale que les réfections. Dans ce sens, les étapes à suivre pour la requalification des vaisseaux sous pression seraient :

1. Recueillir des informations sur la conception et les conditions d'opération;
2. Effectuer une analyse de base pour établir la pression de service maximale admissible et pour identifier les zones à forte sollicitation;
3. Effectuer des inspections visuelles et des examens non destructifs;
4. Faire une analyse détaillée pour confirmer la pression maximale admissible actuellement;
5. Établir l'intervalle recommandé pour les inspections futures.

2.4. Les modélisations récentes

De nos jours, le profil et la conception des passages PHYDR sont bien analysés à l'aide de la modélisation et de la simulation par éléments finis. Également, diverses sortes de matériaux sont considérés pour les parois. Des analyses particulières sont effectuées pour les lois de fermeture et d'ouverture des directrices. Les paramètres d'opération des GTA, y compris la pression, sont fréquemment enregistrés, parfois même en mode continu. Les programmes de « Big data acquisition », ainsi que les méthodes puissantes de traitement du signal permettent aux producteurs et aux concepteurs d'analyser une multitude de facteurs et d'événements. Les méthodes et dispositifs proposés pour atténuer les effets des coups de bâlier sont plus sophistiqués et comprennent des recommandations pour la conception, l'exploitation, la maintenance et les réfections.

Contrairement à l'hypothèse classique de perte de charge constante, les nouveaux modèles dynamiques de coup de bâlier développé conceptualisent le GTA en rotation comme une perte de charge variable interférant avec le PHYDR à travers la roue qui agit comme un orifice dynamique. Selon Ramos et Almeida (2001; 2010), la roue en survitesse agit comme un orifice dynamique. Cependant, les facteurs influençant cette variation de charge sont moins définis et documentés. L'importance de chaque facteur n'est pas mise en évidence ni toujours liée aux paramètres techniques du GTA sur lesquels on peut agir par ajustement. Selz (1986) note aussi que la surpression occasionnée par le coup

de bélier est un enjeu de sécurité quant au respect de la pression maximale de service admissible, qui doit être actualisée en fonction de l'état de dégradation éventuel du passage hydraulique.

Un modèle dynamique du coup de bélier est proposé pour les turbines à réaction, surtout pour celles munies de longues conduites, en considérant que le coup de bélier serait influencé par la vitesse ou la survitesse de la roue (Ramos et Almeida 2001). Cette nouvelle approche est basée sur le concept d'un orifice dynamique équivalent et a été développée pour modéliser les effets du coup de bélier provoqué par le GTA sur le PHYDR.

Ramos revient ultérieurement (2010) avec un développement du modèle mathématique du coup de bélier pour le calcul préliminaire des turbines à réaction (Francis). L'idée centrale est encore que la roue en survitesse agit comme un orifice dynamique et non comme une perte de charge fixe/constante.

Ghidaoui, Zhao, McInnis et Axworthy font un recueil des théories et des modèles existants avec leurs limitations et leurs hypothèses de calculs (2005). Cette mise à jour valeureuse serait indispensable pour identifier les directions de recherche et les améliorations dans le domaine des coups de bélier. Une liste des logiciels de calculs existants dans le domaine est proposée, incluant la description du champ d'application, les modèles utilisés et les points forts de chacun. Ils recommandent de faire une adaptation de ces modèles pour le cas particulier des PHYDR et des GTA.

Les lois de fermeture à pentes multiples, ainsi que la fermeture désynchronisée d'une paire des directrices commencent à préoccuper les fabricants de GTA (Xiaoqin et al., 2013). Les résultats obtenus sont présentés et ils concluent que la loi de fermeture des directrices influence grandement les sollicitations induites lors des rejets de charge :

- ✓ Deux directrices qui ferment de façon asynchrone améliorent le comportement du GTA et des sollicitations en coups de bâlier lors des délestages;
- ✓ L'utilisation d'une loi de fermeture à pente multiple diminue les sollicitations;
- ✓ Le meilleur résultat a été obtenu avec deux directrices qui ferment de façon asynchrone sur des lois de fermeture à pente multiples pour les deux organes.

Zheng, Tian, Gui, Li et Zou (2014) proposent un modèle d'interaction en régime transitoire pour les très grandes PHYDR et GTA basé sur l'hypothèse qu'une modélisation convenable du trajet hydraulique pourrait éliminer les effets indésirables en régime transitoire. Ainsi, un arrangement avec tube aspirateur optimisé a permis d'éliminer la chambre d'équilibre, le temps de fermeture des directrices et les ajustements du régulateur de vitesse. Les séquences d'arrêt/démarrage du groupe ont été améliorées et les prédictions du modèle utilisé ont été confirmées avec des observations expérimentales.

Huanhuan, Diyi, Xinguang et Yonghong (2016) élaborent un modèle mathématique sur le comportement d'un GTA en rejet de charge afin de considérer qu'en délestage le GTA induit une sollicitation de coup de bâlier sur le PHYDR par le modèle d'impact élastique. La stabilité du GTA, issue de l'analyse du modèle, peut être améliorée par une optimisation de la loi de fermeture des directrices et le modèle mathématique proposé pour le GTA est très élaboré, de type dynamique et non linéaire, incluant :

- ✓ Une modélisation globale pour une turbine Francis;
- ✓ Une modélisation de l'alternateur, modélisation du régulateur vitesse;
- ✓ Une modélisation du couple résultant en fonction de l'ouverture des directrices;
- ✓ L'énoncée des 6 équations des coefficients de transfert non linéaires pour raffiner la modélisation.

Wencheng et Daoyi (2018) proposent un modèle d'interaction du GTA en régime transitoire sur les PHYDR très longues afin de considérer que les régimes transitoires du GTA sont influencés par la longueur de la conduite forcée. Le phénomène des transitoires pour les conduites forcées très longues est très complexe. Dans ce cas de figure, la configuration de la cheminée d'équilibre influence les transitoires encore plus que la loi de fermeture du vannage. La régulation de vitesse du GTA devrait aussi être considérée dans le phénomène.

Plus récemment, Nicolet, Dreyer, Béguin, Bollaert, Torrent et Dayer (2018) présentent la méthode « Hydro-Clone / SIMSEN » de simulation en temps réel pour monitorer le PHYDR. Le phénomène de coup de bélier, ainsi que la fatigue peuvent être simulés et reproduits en temps réel par modélisation numérique afin de prévenir l'endommagement du PHYDR. Ils présentent la validation des résultats dans l'analyse du cas particulier pour la centrale Cleuson-Dixence où la conduite forcée de la centrale avait subi une rupture catastrophique en décembre 2000. Le système de monitoring s'est avéré fiable et mature permettant la surveillance des phénomènes transitoires. Une période de 8 mois d'utilisation en continu du système proposé a permis de conclure que l'approche est un succès.

Toujours pour la méthode numérique « Hydro-Clone / SIMSEN », Dreyer, Nicolet, Gaspoz, Biner, Rey-Mermet, Saillen et Boulicaut (2019) reviennent avec un développement et une autre validation, plus récente, appliquée à la simulation des dommages occasionnés par l'exploitation flexible des GTA sur les PHYDR. Dans l'analyse du cas particulier pour la centrale La Bâthiaz, il a été possible, par simulation numérique, de reproduire en temps réel les sollicitations, ainsi que la fatigue et de prédire le vieillissement du PHYDR. Les mesures ont démontré que les prédictions du modèle concordent avec la réalité, qu'il y a une relation directe entre les variations des pressions transitoires et les sollicitations auxquelles le PHYDR est soumis. Il a été estimé que dans le

scénario d'exploitation flexible le taux d'usure du PHYDR est 10 fois plus élevé qu'en exploitation normale / de base.

Une très valeureuse revue des théories, ainsi qu'une validation par expérimentation des concepts qui gèrent le comportement dynamique de la turbine en lien avec la structure de base, y compris le PHYDR, a été faite dernièrement par Dollon (2019) dans son Devis de Recherche doctorale. Il a démontré que les régimes transitoires contiennent une information fréquentielle, exploitable et convertible en propriétés modales ou structurales et il établit une cartographie des phénomènes d'excitation, en fonction de la configuration de la machine et de la zone à l'étude. Il a défini une procédure fiable et automatique de détection et d'identification modale adaptée au cas des régimes transitoires en considérant la possibilité d'extraire des paramètres structuraux (masse, amortissement ou rigidité ajoutée) ou des paramètres modaux (déformation, pulsation ou coefficient d'amortissement). Il a validé aussi la cohérence entre les résultats expérimentaux et numériques et il a suggéré une méthode permettant de prédire un type d'essai idéal pour la caractérisation, afin d'optimiser la dégradation, limiter le temps d'immobilisation de la turbine et augmenter la quantité d'information modale.

2.5. Matrice de la revue de littérature

La revue de littérature présentée dans la section précédente a permis de synthétiser les éléments principaux de chaque article sous la forme d'une matrice. En utilisant un code de couleurs pour représenter les variables exploitées dans chaque texte, il est possible de voir facilement les facteurs les plus reconnus et ceux qui le sont moins. Cet exercice aide à déterminer le cadre conceptuel de la recherche qui sera présenté ensuite.

La Figure numéro 1 présente l'exemple de traitement pour un des articles dans la Matrice de la revue de littérature, tandis que la Matrice complète se trouve à l'Appendice A.

| Article | Objectif | Méthodologie | Hypothèses | VARIABLE DÉPENDANTE : Durée de vie des PHYDR | Conclusions |
|---|--|--|---|--|--|
| | | | | VARIABLES INDEPENDENTES | |
| [1] Établissement des conduites forces Bouchayer A. La Houille Blanche n° 8 France décembre 1902 | Faire une revue des premières conduites forcées et rappeler les principes de calcul. | Revue des théories, des concepts. Analyse de cas particulier. | Les facteurs d'influence sur la durée de vie (DdV) des PHYDR identifiés après les premières 65 ans d'expérience avec les conduites forcées restent dans le domaine de la résistance des matériaux classique. Le domaine serait bien maîtrisé et ne nécessiterait que des formules plutôt simples. | 5 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 2 = dégradation de la Pconception d'origine VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = impact des sollicitations uniques sur DdV | <ul style="list-style-type: none"> en 1902 : abord simpliste de la conception des PHYDR, toutes les formules sont mentionnées comme "très simples" le temps de fermeture des directives GTA qui un facteur critique/majeur pour le coup de bâlier est calculé par une formule "très simple". pas de calcul du trajet hydraulique PHYDR, seulement simpliste du débit pour l'épaisseur de la paroi. à l'époque il y avait plutôt des grands consommateurs qui pourraient facilement provoquer des rejets de charge dans les réseaux isolés existants. la dégradation de la Pconception d'origine dans le temps n'est influencée que par oxydation et de plus, depuis 20 ans, ce phénomène serait sous contrôle / sans inquiétude (repeindre aux 3-4 ans). l'impact des sollicitations cycliques ou par fatigue sur n'est pas du tout pris en compte = lacune à l'époque |

Figure 1 - Exemple d'un article dans la Matrice de la revue de littérature

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE

3.1. Liste des variables

La variable dépendante retenue a été la durée de vie des PHYDR.

Suite à l'analyse de la revue de littérature présentée dans la matrice, 6 facteurs ont été retenus comme ayant un impact sur la fiabilité des passages hydrauliques. La Figure numéro 2 présente le tableau des facteurs retenus comme variables indépendantes, ainsi que leurs parutions respectives dans les articles de la revue (de A1 à A17).

| Variable indépendante | Nombre de parution dans les articles | | | | | | | | | | | | | | | | Total | | |
|--|--------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|----|----|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 | A16 | A17 | nr | % |
| VI 1 = critères de conception | 6 | 3 | 7 | 1 | 3 | 5 | 8 | 2 | 2 | 2 | 4 | 5 | 6 | 2 | 2 | 7 | 8 | 73 | 25 |
| VI 2 = dégradation de la Pconception d'origine | 2 | | | | | | 2 | | | 1 | | | | | | 9 | | 14 | 5 |
| VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR | 2 | 5 | 4 | | 2 | 2 | 3 | 6 | 5 | 3 | 3 | 2 | 4 | | 3 | | | 44 | 15 |
| VI 4 = modélisation du coup de bâller par GTA | 2 | 10 | | 7 | 12 | 10 | 6 | 8 | 1 | | 4 | 7 | 4 | 6 | 4 | | 6 | 87 | 11 |
| VI 5 = impact des sollicitations uniques | 3 | 4 | 2 | 1 | 1 | 5 | 1 | | 3 | | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | | 6 | 40 | 14 |
| VI 6 = impact des sollicitations cycliques | | 2 | 5 | 1 | | | 1 | | 3 | 5 | | 2 | 1 | | | | 10 | 30 | 10 |

Figure 2 - Tableau des variables indépendantes

La Figure numéro 3 présente les catégories des facteurs sous forme d'un diagramme Ishikawa.

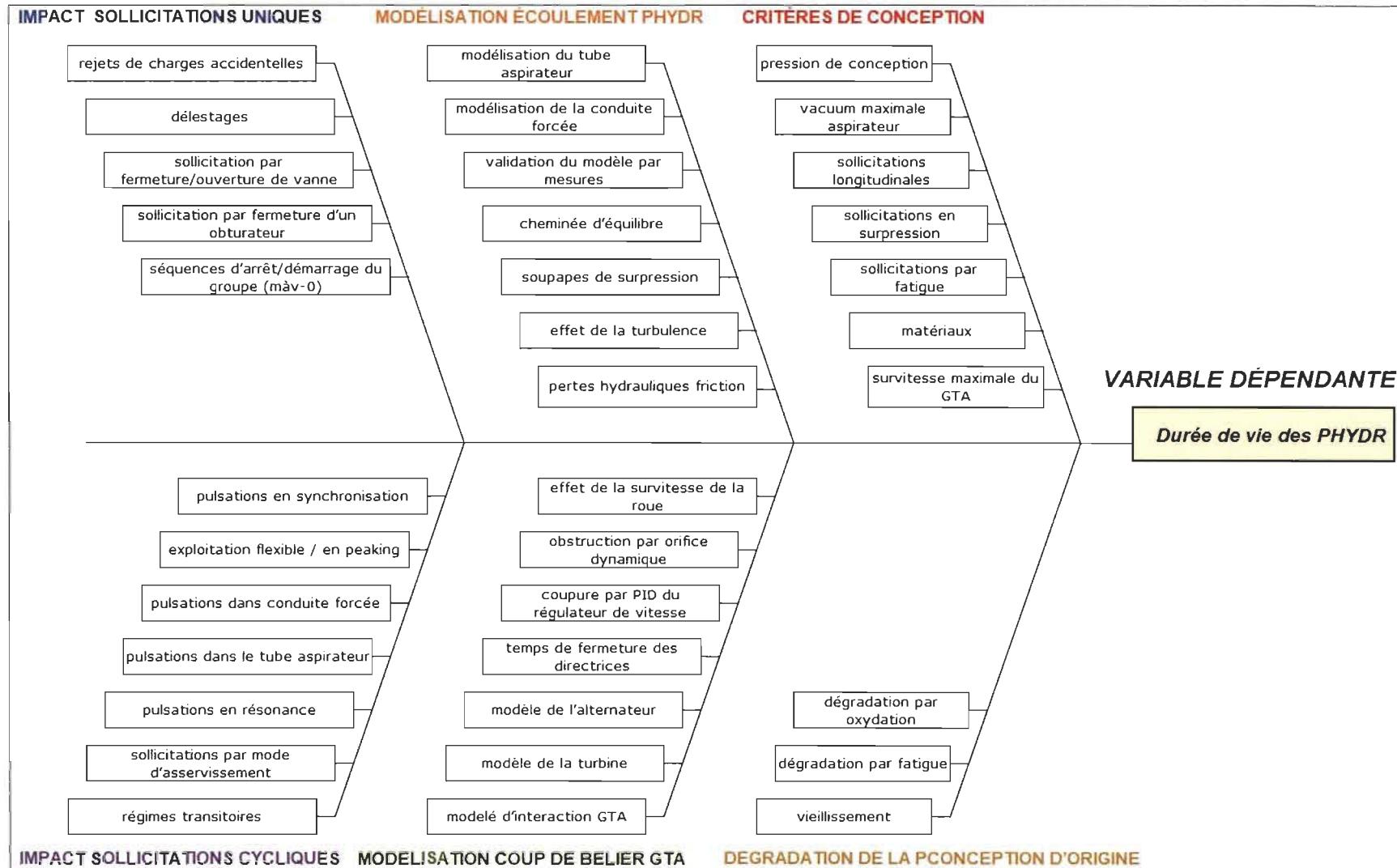


Figure 3 - Diagramme Ishikawa

3.2. Modèle de recherche

Le modèle de recherche est présenté dans la Figure numéro 4 et les hypothèses qui relient chacune des variables indépendantes avec la variable dépendante sont ensuite données dans la Figure numéro 5. L'ordre de numérotation des variables et des hypothèses n'est pas relié à l'ordre d'importance des impacts sur la variable dépendante.

La Figure numéro 4 montre le modèle de recherche et les détails des hypothèses qui relient les variables indépendantes à la variable dépendante sont listés par la suite.

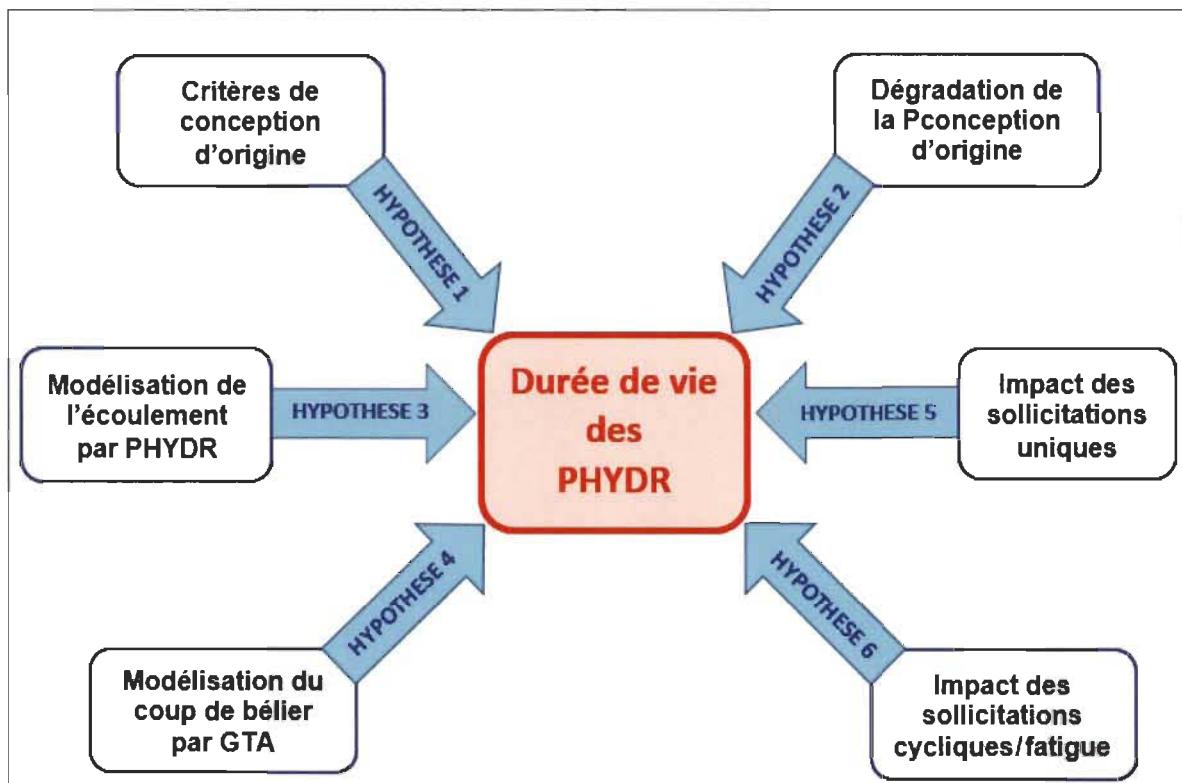


Figure 4 - Le modèle de recherche

Détail des hypothèses :

HYPOTHÈSE 1 : Critères de conception

Des critères de conception précis et conservatifs auront comme résultat un PHYDR mieux conçu, robuste => la durée de vie de l'équipement sera plus élevée.

HYPOTHÈSE 2 : Dégradation de la valeur de la pression de conception d'origine

Si la pression de conception d'origine n'est pas descendue pour tenir compte du vieillissement et les ajustements refaits en conséquence => le PHYDR verra des sursollicitations qui lui diminueront la durée de vie.

HYPOTHÈSE 3 : Modélisation de l'écoulement par PHYDR

Plus la modélisation du PHYDR sera adaptée à l'application, plus l'écoulement sera stable, les fluctuations de pression atténuées => il y aura moins de sollicitations et la durée de vie sera plus élevée.

HYPOTHÈSE 4 : Modélisation du coup de bélier par GTA

Plus la modélisation du phénomène de coup de bélier provoqué par GTA sera fidèle à la réalité => la conception et les ajustements mécaniques permettront de diminuer les sollicitations, donc la durée de vie sera plus élevée.

HYPOTHÈSE 5 : Impact des sollicitations uniques

Le GTA, qui participe à une opération flexible (en pointe), envoi plus de sollicitations ponctuelles de type coups de bâlier au PHYDR => la durée de vie sera diminuée.

HYPOTHÈSE 6 : Impact des sollicitations cycliques / fatigue

Le GTA, qui participe à une opération en charge partielle (en équilibrage de réseau) ou encore en pointe, envoi plus de sollicitations de type vibration et surpressions transitoires au PHYDR => la durée de vie sera diminuée.

La Figure numéro 5 montre les interrelations entre les variables indépendantes (de A à H) et le détail de ces liens sont présentés par la suite.

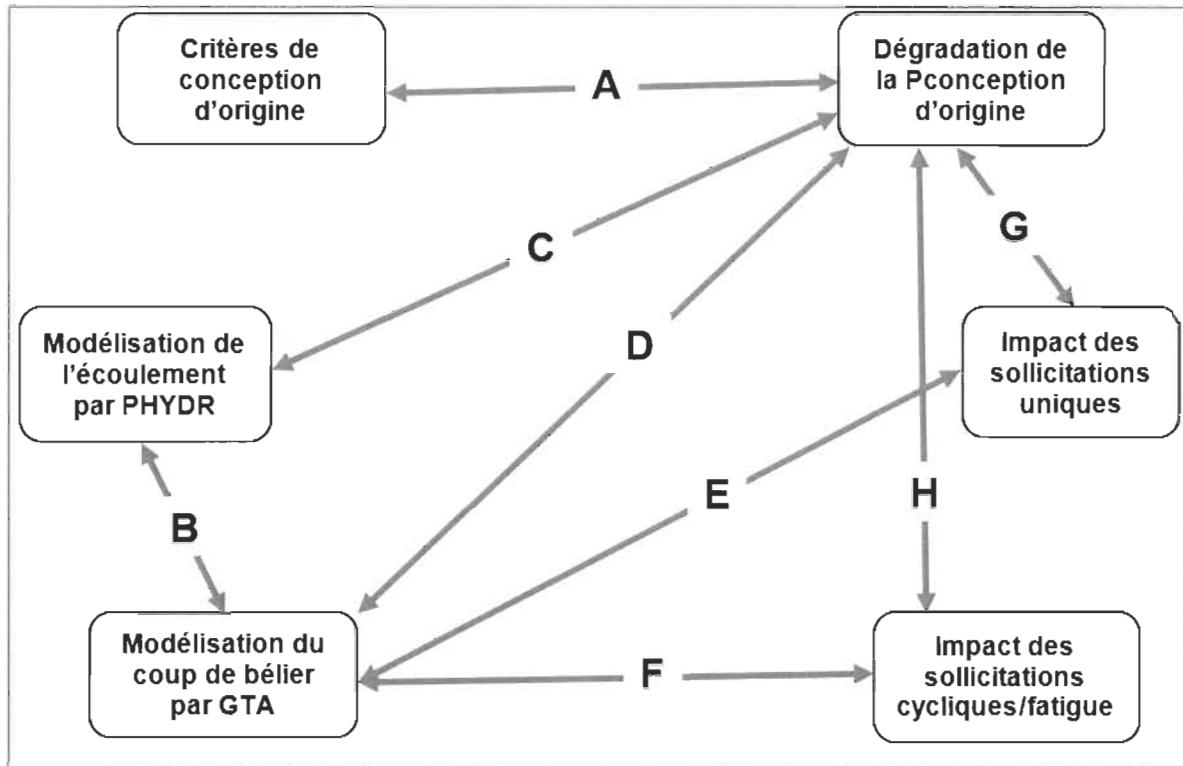


Figure 5 - Les interrelations entre les variables indépendantes

Détail des interrelations :

RELATION A : La dégradation de la pression de conception d'origine doit être considérée avec les critères de conception et devrait être validée périodiquement (corrélation évoquée par les auteurs des articles 1, 2, 10, et 16).

RELATION B : La modélisation conjointe de l'écoulement dans le PHYDR et du phénomène de coup de bélier est un besoin réel (corrélation évoquée par les auteurs des articles 1, 2, 8, 11, et 17).

RELATION C : La modélisation de l'écoulement dans le PHYDR doit tenir compte du vieillissement de l'équipement (corrélation évoquée par les auteurs des articles 1 et 7).

RELATION D : Une bonne modélisation du phénomène de coup de bélier aura un effet positif sur le vieillissement du PHYDR (corrélation évoquée par les auteurs des articles 1 et 7).

RELATION E : Une modélisation appropriée du coup de bélier permettra de diminuer l'impact des sollicitations uniques (corrélation évoquée par les auteurs des articles 2, 6, 11, 12, 14, 15 et 17).

RELATION F : Une bonne modélisation du phénomène de coup de bélier permettra de diminuer l'impact des sollicitations cycliques / fatigue (corrélation évoquée par les auteurs des articles 2, 12, et 17).

RELATION G : Les sollicitations uniques auront un impact direct sur la dégradation de la pression de conception d'origine (corrélation évoquée par les auteurs des articles 1 et 7).

RELATION H : Les sollicitations cycliques / fatigue auront un impact direct sur la dégradation de la pression de conception d'origine (corrélation évoquée par les auteurs des articles 1 et 7).

La méthode utilisée pour cette recherche sera d'une part l'analyse des données disponibles dans les bases d'Hydro-Québec (essais de mise en

service, exploitation normale, évènements réseau) et d'une autre part des expérimentations de validation.

3.3. Feuille de route d'un projet de recherche

Selon les hypothèses 3 et 4, la modélisation du coup de bâlier est en lien avec les paramètres d'exploitation du GTA, respectivement la conception du PHYDR, tandis que selon les hypothèses 5 et 6 les sollicitations uniques et cycliques / fatigue vont impacter sur la dégradation et la durée de vie des équipements. Les interrelations E et F soulignent qu'une modélisation appropriée permettra de diminuer l'impact des sollicitations, alors que la relation D annonce un effet positif aussi sur le vieillissement du PHYDR. Il en résulte qu'en termes de gestion des actifs, les sollicitations constituent un facteur important à la base du calcul de dégradation des équipements. Par conséquent, les efforts de recherche seront concentrés sur l'analyse de données expérimentales, plus particulièrement pour évaluer les tendances et l'influence des divers paramètres qui provoquent les sollicitations extrêmes.

La Figure numéro 6 présente sur une feuille de route le cheminement standard, qui a servi comme guide pour définir la stratégie et la méthodologie afin de rencontrer les objectifs de la recherche.

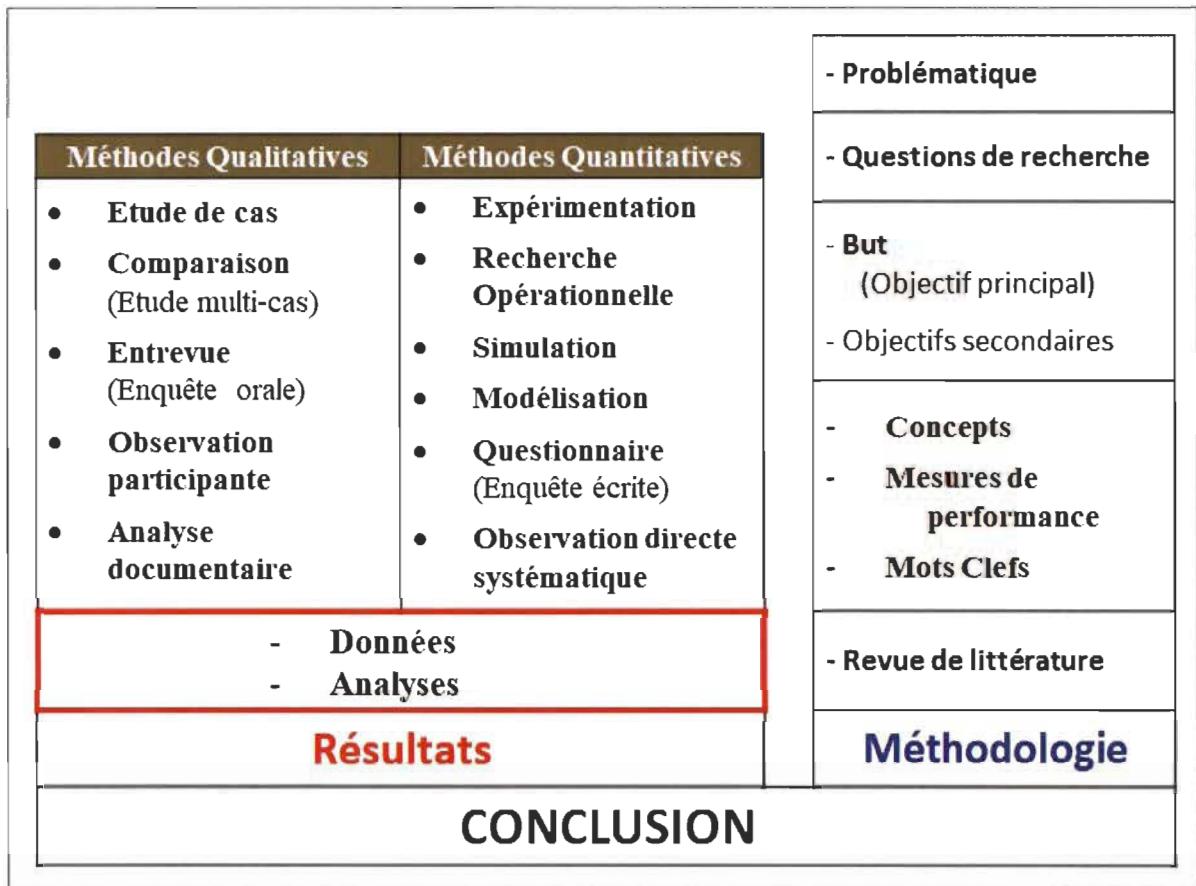


Figure 6 - Feuille de route d'un projet de recherche

3.4. Méthodologie de recherche

L'idée centrale de la méthodologie, documentée aussi par la revue de littérature, est d'analyser de quelle façon la roue en survitesse agit comme un orifice dynamique et non comme une perte de charge fixe, constante. Le phénomène serait à considérer dans l'environnement d'écoulement créé par les directrices qui dirigent le débit d'eau et l'orientent vers les pales de roue. Les autres facteurs d'influence seront aussi à considérer.

La méthode employée a été orientée vers :

- ✓ Analyse des données existantes pour le comportement lors d'un essai de délestage typique d'un groupe d'Hydro-Québec :
 - Essais de mise en service;
 - Essais de réajustement du temps de fermeture rapide des directrices (notation tBAF pour le mémoire);
 - Évènements réseau.
- ✓ Analyse du comportement lors de l'exploitation normale :
 - Exploitation normale avec la régulation du réseau en fréquence et en puissance (notation RFP pour la suite du mémoire);
 - Régulation lors des évènements réseau;
 - En arrêt normal.
- ✓ Expérimentation de validation.

Des mesures expérimentales du comportement des GTA ont été faites lors des rejets de charges sur différentes configurations de GTA et PHYDR des groupes exploités par Hydro-Québec.

La cueillette des données, dans des zones sensibles, a été possible grâce à la comparaison en temps réel de la surpression obtenue avec la pression de conception et le maintien de la survitesse de la partie tournante en deçà des valeurs acceptables. Les essais ont été canalisés sur l'obtention des résultats, permettant l'analyse de l'impact de la vitesse de fermeture des directrices

considérée comme facteur principal d'influence sur les surpressions. Par conséquent, le résultat de la recherche sera un portrait, le plus complet possible, des différentes interrelations entre les variables indépendantes dans le but de raffiner l'interaction du GTA avec le PHYDR lors des régimes transitoires, notamment les délestages. La méthodologie employée pour cette recherche nous permettra aussi d'avancer les modélisations GTA pratiquées dans d'autres projets en lien avec le sujet à l'étude.

Les limites de la méthodologie développée proviennent principalement du fait que lors des essais les efforts ont été concentrés surtout sur un seul facteur (le temps de fermeture rapide des directrices). Donc, afin de compléter le travail avec l'influence des autres facteurs sur le coup de bâlier, des essais supplémentaires seraient requis.

Un plan d'expériences (DOE, « Design of Experiments ») complémentaire viendrait avec des inconvénients :

- ✓ Être couteux et long à développer (vue la multitude des facteurs d'influence et des interrelations);
- ✓ Les expérimentations à faire seraient nombreux et idéalement il faudrait les répéter sur plusieurs configurations de GTA/PHYDR;
- ✓ Il est assez difficile d'effectuer des essais dans des centrales hydroélectriques (disponibilité des groupes réduite, instrumentation spécifique pas toujours existante en terrain, besoin de personnel spécialisé);

- ✓ Un complément expérimental sur banc d'essai pourrait être requis;
- ✓ Le modèle mathématique pour inclure tous les facteurs d'influence serait complexe et difficile à élaborer.

Selon la méthodologie proposée, l'horizon d'investigation a été limité et les recherches ont été axées surtout sur les charges extrêmes (cycles de basse fréquence « Low Cycle Fatigue», LCF pour la suite du mémoire). Pour éliminer cet inconvénient, lors des essais à venir il reste à investiguer davantage sur les sollicitations cycliques pression-fréquence (cycles de haute fréquence « High Cycle Fatigue», HCF pour la suite du mémoire) et établir la causalité entre ces charges et les divers facteurs à l'étude.

CHAPITRE 4 - RÉSULTATS

La campagne expérimentale sur le comportement des GTA a comporté des rejets de charges effectués sur 24 configurations de GTA différent au sein de la flotte d'Hydro-Québec (A à Z dans le texte) pour :

- ✓ Différents types de turbine (Francis, Kaplan, hélice, saxo);
- ✓ Puissances diverses (de 4 à près de 400 MW);
- ✓ Différents PHYDR (long/court, souterrain/externe, basse/haute chute, béton/mécano-soudé).

À différentes ouvertures de vannage, des déclenchements de ligne ont été simulés pour activer la séquence de protection d'urgence des GTA et commander une fermeture rapide du vannage. Les paramètres enregistrés ont été :

- ✓ Position des directrices (notation % WG pour la suite du mémoire);
- ✓ Pression dans la bâche spirale et conduite d'amenée;
- ✓ Vitesse de la partie tournante du groupe;
- ✓ Pression dans le tube d'aspiration.

Les principaux objectifs de cette campagne expérimentale ont été :

- ✓ Valider ou établir et réajuster la pente de fermeture rapide afin de maintenir la surpression dans le passage hydraulique en dessous de la pression admissible actualisée au moment de l'essai;
- ✓ Limiter la fluctuation en pression et dépression, se garder loin du vide à l'intérieur de l'aspirateur;
- ✓ Limiter les contraintes dans les aubes de roue d'eau lors de la séquence de démarrage et d'arrêt de l'unité, ainsi que lors des fluctuations de charge (projet THAUR de HQ-IREQ);
- ✓ Réduire l'intumescence à la prise d'eau lors des rejets de charge.

Pour chaque configuration, plusieurs temps de fermeture rapide ont été essayés afin de maîtriser le comportement du groupe et d'optimiser les paramètres d'exploitation. Tous ces essais ont été menés en respectant la survitesse acceptable pour la partie tournante du groupe.

La campagne d'essais a été organisée afin d'identifier les facteurs qui contribuent au phénomène de coup de bélier et d'établir leur influence. Les résultats établissant la causalité entre le stress induit et les effets permettront d'optimiser le mode de fonctionnement du GTA et par conséquent d'adapter le programme de maintenance. Les relations trouvées permettront de déterminer l'impact des :

- ✓ Évènements extrêmes majeurs : coups de bâlier / pics d'amplitude (LCF), auront des effets immédiatement visibles en amorçant des fissures, voire en provoquant des ruptures de conduite;
- ✓ Régimes d'exploitation dangereux : pics de pression / cycles pression-fréquence (HCF), auront des effets temporels en propageant les fissures;
- ✓ Zones de champs de pression non stationnaires : les fluctuations de pression ou de dépression provoqueront des microfissures, de la fatigue et de la cavitation.

Les essais ont été organisés sur quatre axes d'analyse :

- ✓ Évaluer les tendances des valeurs limites des paramètres en fonction de l'ouverture du vannage au moment du rejet de charge afin d'identifier sur les courbes de tendance, ainsi que les zones où les valeurs sont maximales. L'évolution globale des paramètres pour différents types de GTA permettra d'orienter des essais futurs de mise en service ou de réajustement pour des turbines hydrauliques. Particulièrement, le respect de la pression de conception PHYDR pour la surpression, ainsi que les critères du vacuum pour la partie aspirateur ont été assurés surtout dans les zones critiques. L'évolution en survitesse du groupe au moment des délestages a été aussi surveillée et gardée dans des valeurs acceptables.

- ✓ Analyser l'influence des différents facteurs agissant directement sur la surpression dans la bâche spirale afin de séparer la contribution de chacun. Pour différents types de GTA, l'analyse doit permettre de quantifier, en fonction de l'ouverture de vannage au moment du rejet de charge, l'impact de la variation de chacun des paramètres, surtout du tBAF. Connaître la pondération de chaque paramètre facilitera la prise de décision concernant la pertinence des ajustements lors des essais de mise en service. Cela permettra d'intervenir sur les facteurs les plus influents dans des circonstances données pour limiter les surpressions.
- ✓ Faire une analyse temporelle des facteurs influençant le coup de bâlier afin d'observer des relations cause à effet entre les facteurs d'influence de la surpression. Cela permettra d'identifier des interactions, de définir des périodes et de retenir les facteurs ayant une importance majeure. La comparaison, par la suite des valeurs et comportements préconisés par les formules / modèles théoriques d'usage dans le domaine avec les valeurs obtenues, confirmera d'une part la pertinence des essais et d'une autre part validera ces modèles.
- ✓ Analyse des comportements exceptionnels survenus lors des essais pour identifier l'origine de ces comportements inhabituels/ inattendus.

De façon générale, nous allons porter une attention particulière aux surpressions dans les zones transitoires. Les tendances, les comportements et les facteurs d'influence observés permettront de mieux orienter les modèles de calcul et d'aider à trouver les principaux facteurs à prendre en compte lors de la conception de PHYDR, ainsi que les paramètres à ajuster lors de la mise en service du GTA.

Afin de faciliter la compréhension des démarches et l'interprétation des résultats, à l'Appendice B sont présentées les notions techniques en lien avec les essais performés dans les centrales d'Hydro-Québec :

- ✓ Types de PHYDR rencontrés lors des essais;
- ✓ Types de GTA utilisés avec les différentes composantes;
- ✓ Mécanismes de contrôle des GTA;
- ✓ Principes, paramètres et ajustements de protection des GTA;
- ✓ Types et fonction de régulateurs de vitesse des GTA;
- ✓ Procédure des essais;
- ✓ Paramètres mesurés ou enregistrés lors des essais.

Les résultats présentés ici-bas ont été annoncés déjà dans le cadre du congrès international portant sur la gestion des actifs qui a eu lieu du 15 au 18 août 2021 au Brésil « World Congress on Engineering Asset Management -15th WCEAM », (Lupa et al., 2021), voir l'Appendice C.

4.1. Tendances de la surpression en fonction du type de GTA

Les résultats des essais de délestage, effectués entre les années (2012-2019), ont été classés selon le type de GTA et de PHYDR associé. Lors des essais, afin de comparer les données et d'identifier les tendances pour chaque configuration, les valeurs obtenues ont été normalisées en fonction de la chute actuelle lors de chaque essai. De façon globale, pour analyser les résultats d'une configuration à l'autre, les valeurs ont été normalisées en fonction de la pression de conception et de la vitesse de marche à vide. Pour faciliter les comparaisons, l'ouverture des directrices au moment du délestage [%WG] a été utilisé en abscisse au lieu de la puissance du groupe.

Le principal paramètre contrôlé lors des scénarios d'essais a été la vitesse de fermeture des directrices. À l'occasion, l'influence des différentes configurations de la deuxième pente ou encore de la vitesse de fermeture des pales et de la courbe de conjugaison ont été observées. Dans quelques cas, l'intumescence du niveau amont et du niveau aval a été prise.

La valeur [%dP] sur les graphiques représente les surpressions d'essais maximales normalisées pour une configuration particulière de centrale (d'A à Z pour la suite du mémoire), normalisées pour la chute maximale et rapportées à la pression de référence (pression statique dans la bâche avec les directrices complètement fermées). Une tendance spécifique a été constatée, un comportement semblable et des valeurs maximales de surpression en fonction de l'ouverture de vannage au moment du rejet de charge.

La polynomiale d'ordre 3 représenterait le plus fidèle évolution des pressions maximales selon les fonctions inscrites sur les graphiques. De façon générale, les surpressions présentent une montée plus accentuée vers les valeurs supérieures d'ouverture du vannage. Des lois de tendance ont été observées aussi pour les autres paramètres à l'étude : variation des pressions/dépression dans l'aspirateur, survitesse du groupe, le taux de fermeture du vannage en eau vive, intumescence à la prise d'eau, etc.

Les tendances des surpressions en fonction de l'ouverture du vannage pour les hélices de basse chute, inférieures à 20 mètres de colonne d'eau (mce pour la suite du mémoire), sont illustrées à la Figure 7.

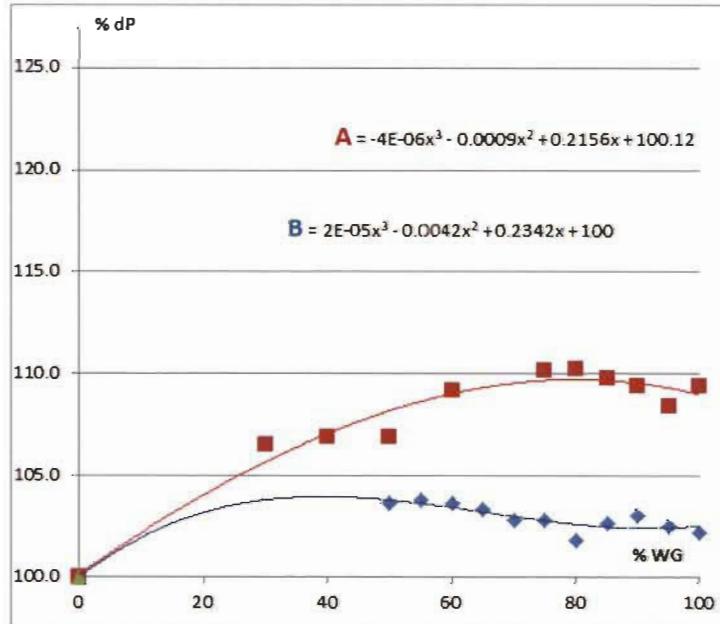


Figure 7 - [%dP] en fonction du [%WG], hélices de basse chute, centrales A et B (2016-2018)

Les tendances pour les Kaplan de basse chute, moins de 40 mce, sont illustrées à la Figure 8 et pour les saxos inférieures à 25 mce à la Figure 9.

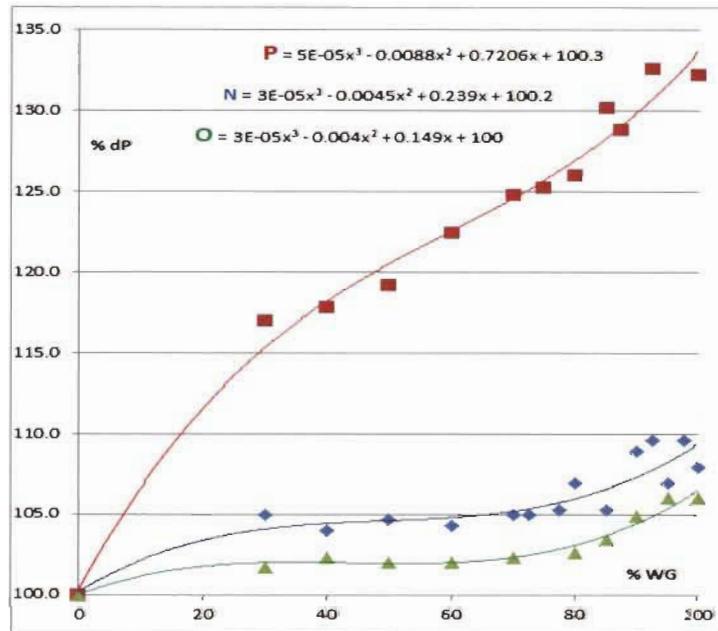


Figure 8 - [%dP] en fonction du [%WG], Kaplan de basse chute, centrales N à P (2016-2017).

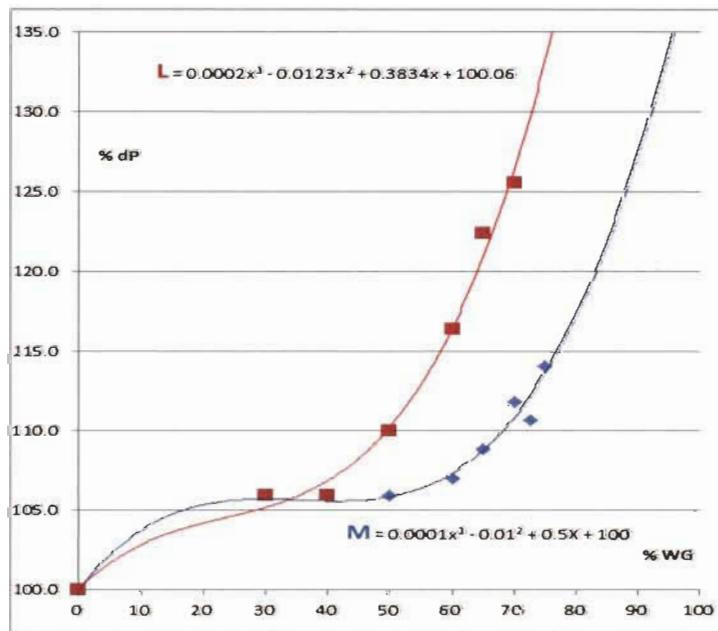


Figure 9 - [%dP] en fonction du [%WG], saxo de basse chute, centrales L et M (2017-2019).

Les tendances des surpressions en fonction de l'ouverture du vannage pour les Francis de basse chute, moins de 20 mce, sont illustrées aux Figures 10 et 11.

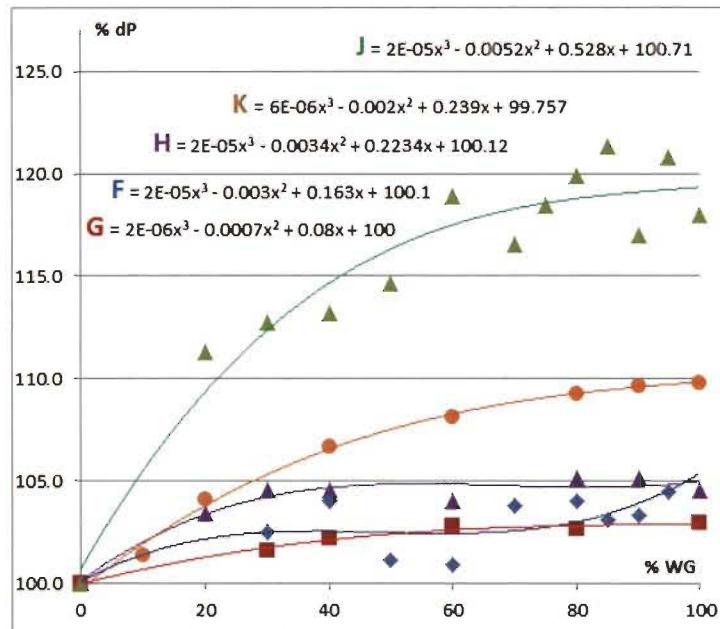


Figure 10 - [%dP] en fonction du [%WG], Francis de basse chute, centrales F à K (2014-2015).

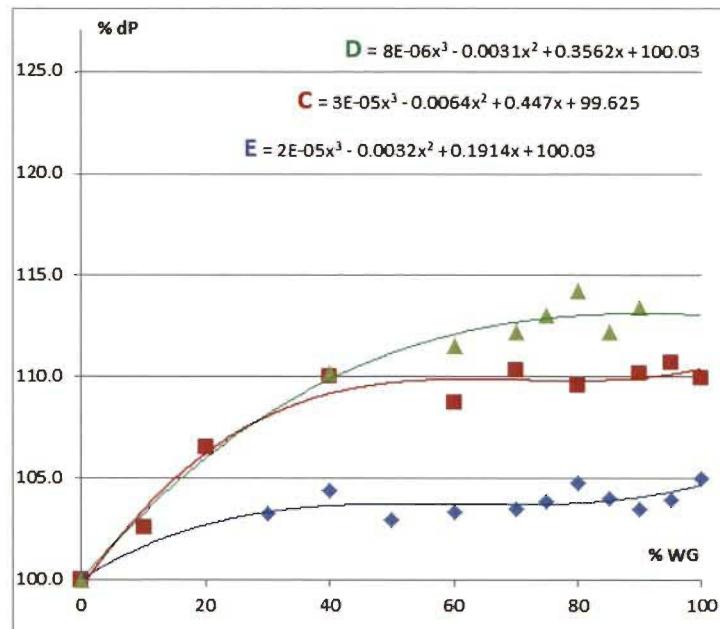


Figure 11 - [%dP] en fonction du [%WG], Francis de basse chute, centrales C à E (2012-2018).

Les tendances des surpressions pour les Francis de chute moyenne, 40 à 50 mce, ainsi que de haute chute, 80 à 140 mce, se trouvent sur les Figures 12 et 13.

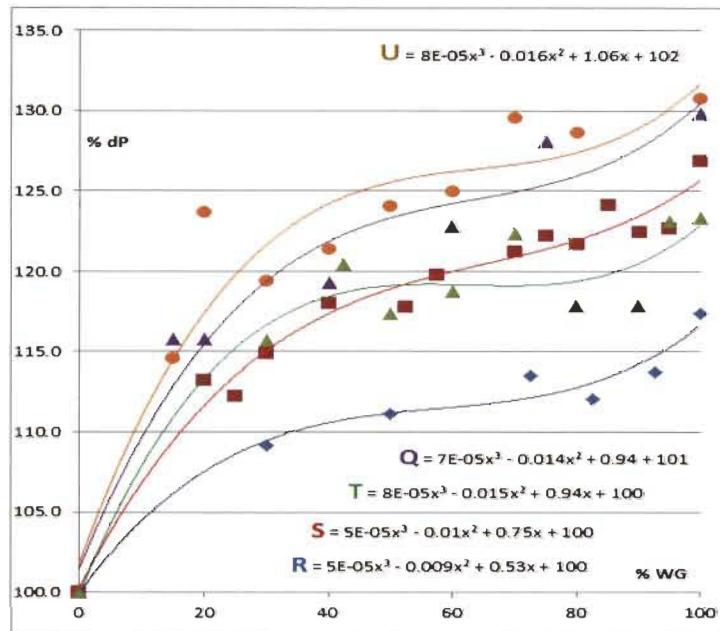


Figure 12 - [%dP] en fonction du [%WG], Francis de chute moyenne, centrales Q à T (2012-2018).

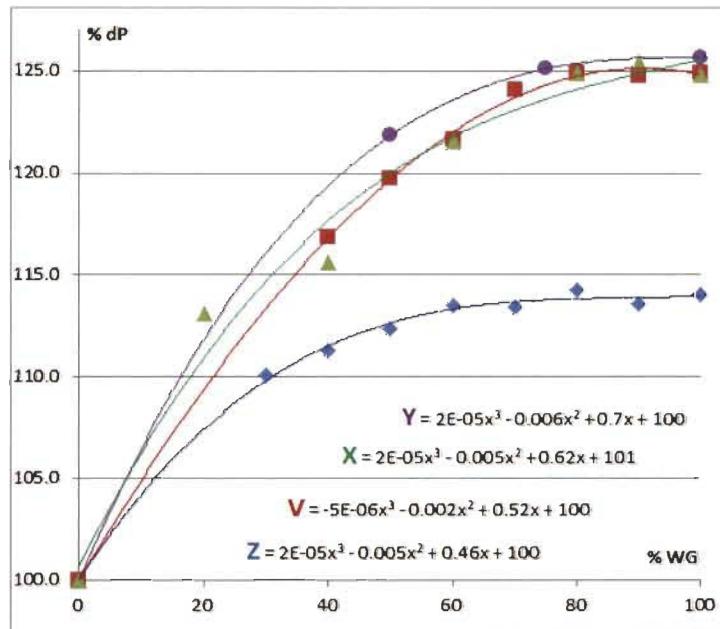


Figure 13 - [%dP] en fonction du [%WG], Francis de haute chute, centrales V à Z (2013-2019).

4.2. Impact du gradient tBAF de la première pente

Pour une configuration de GTA et PHYDR donnée, une analyse a été faite en fonction des différents temps de fermeture rapide des directrices utilisés lors des essais de délestage (t1 à t3 sur les graphiques) afin de séparer la contribution sur la surpression dans la bâche de chacun des facteurs. Comme précédemment pour l'analyse générale des tendances, l'ouverture du vannage est gardée en abscisse.

Dans tous les cas, selon le type de GTA et le type de PHYDR, le modèle de comportement général identifié précédemment s'est répété d'un temps de fermeture à l'autre avec le maintien de la tendance spécifique des évolutions. Il a été constaté une corrélation évidente entre les valeurs de surpressions et la variation du taux de fermeture rapide du vannage. Le même constat demeure aussi pour la survitesse du groupe et la variation de pressions et de dépressions dans l'aspirateur.

L'évolution du %P pour différents tBAF pour une hélice de la centrale A est montrée sur la Figure 14, pour une Francis de la centrale E est sur la Figure 15 et pour une Kaplan de la centrale P sur la Figure 16.

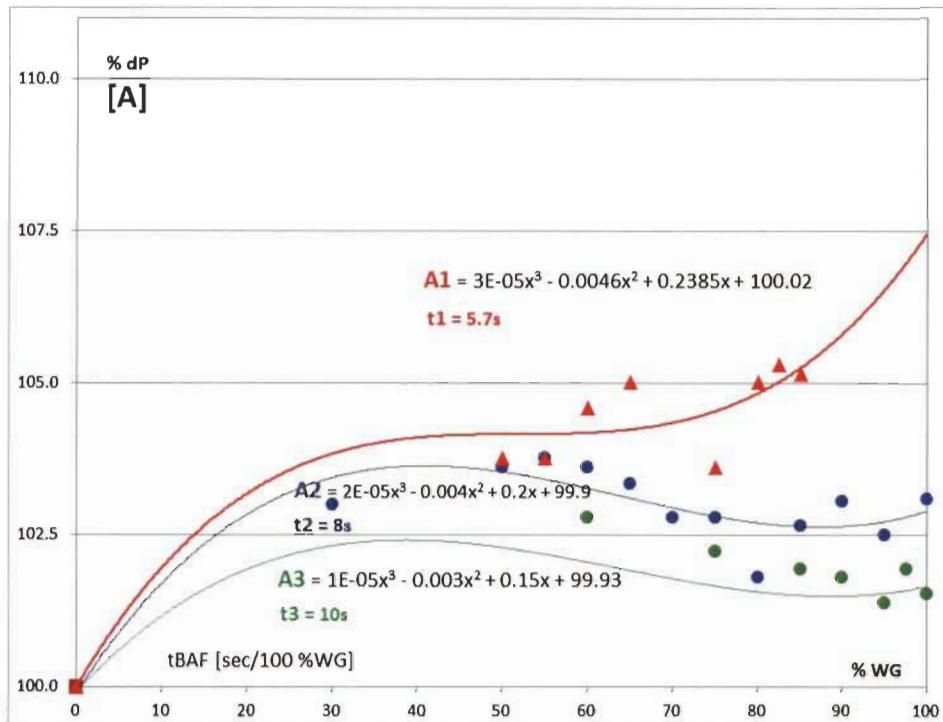


Figure 14 - Variation des [%dP] pour différentes tBAF appliqués à une hélice de la centrale A (2018).

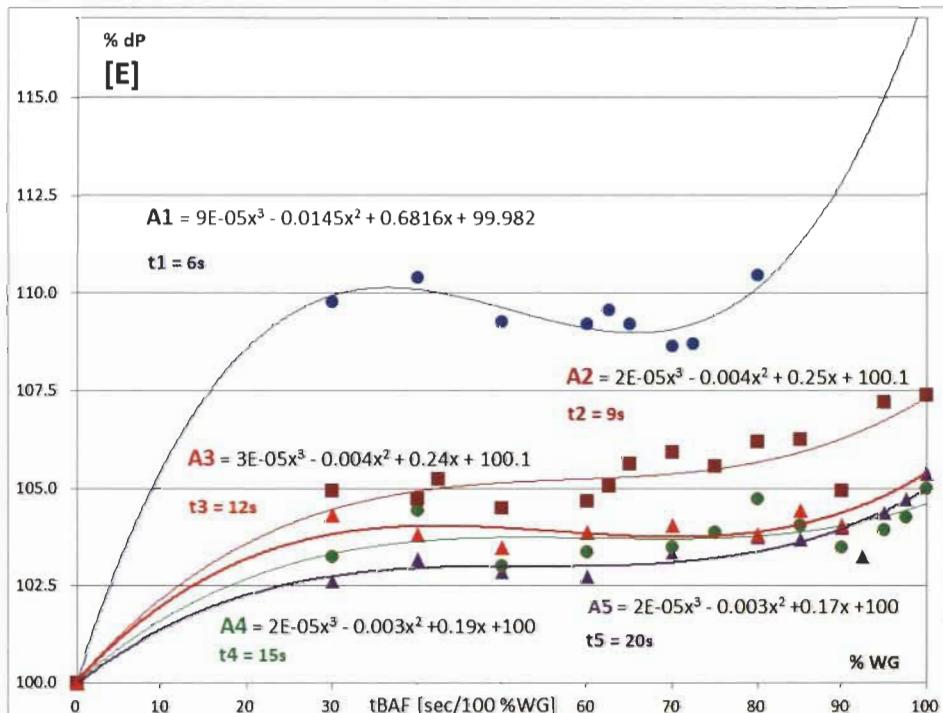


Figure 15 - Variation des [%dP] pour différentes tBAF appliqués à une Francis de la centrale E (2018).

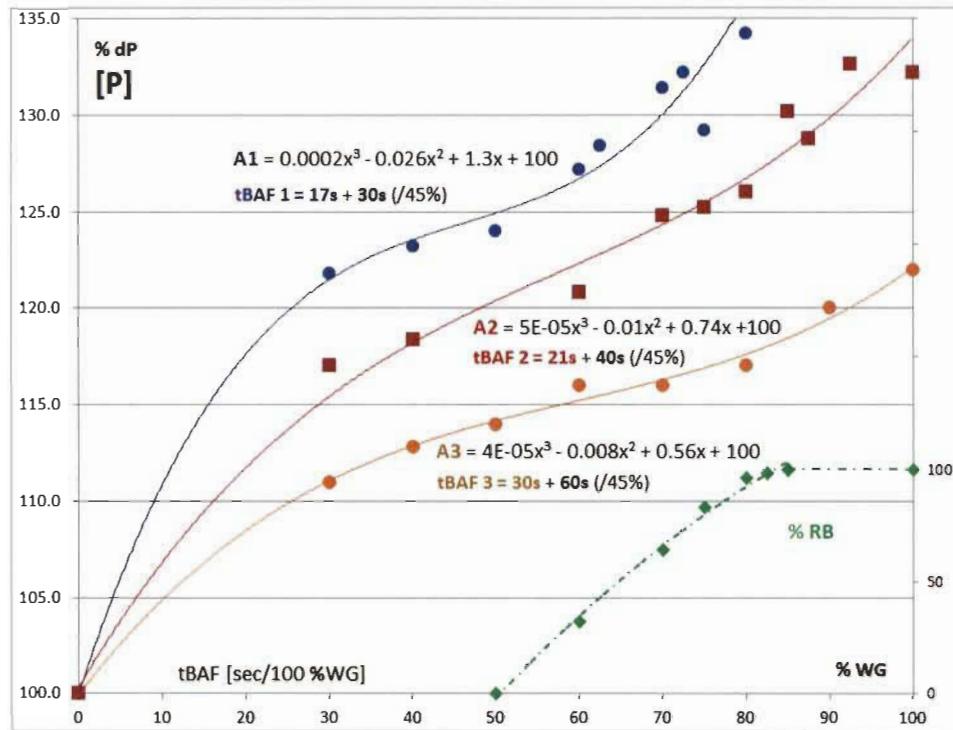


Figure 16 - Variation des [%dP] pour différentes tBAF appliquées à une Kaplan de la centrale P (2017).

Pour les facteurs à l'étude, il a été constaté qu'avec l'augmentation du taux de fermeture rapide des directrices certaines évolutions vont s'aggraver, certaines vont diminuer :

- ✓ Les surpressions dans la bâche spirale augmentent;
- ✓ La survitesse de la ligne d'arbre du groupe descend;
- ✓ Les surpressions et les dépressions dans l'aspirateur augmentent;
- ✓ Les phénomènes d'oscillation et de fluctuation des pressions au long du PHYDR augmentent en amplitude et se produisent plus fréquemment.

On note que les mêmes valeurs absolues des tBAF provoquent des [%dP] différents d'un type de configuration à l'autre. Le constat est encore plus évident si les représentations sont faites pour une même échelle de [%dP].

Les évolutions générales pour différents tBAF avec la mise à une même échelle des surpressions en fonction du %WG se retrouvent sur la Figure 17 pour :

- ✓ Hélice de la centrale A, pression admissible limitée à 105 % de la pression de référence à cause de l'état de dégradation avancé du PHYDR bétonné;
- ✓ Francis de la centrale E, pression admissible limitée à 110 % de la pression de référence pour un état de dégradation normale du PHYDR bétonné;
- ✓ Kaplan de la centrale P, pression admissible limitée à 125 % de la pression de référence pour un PHYDR en segments mécano-soudés sans dégradation.

On observe que des temps tBAF relativement courts (de l'ordre de 8 secondes) sont acceptables pour la centrale figurée dans la première catégorie (hélice de basse chute), tandis que pour la dernière catégorie (Kaplan de basse chute) il faudrait fermer beaucoup plus lentement pour rester dans une zone de pressions acceptables (de l'ordre de 24 secondes, trois fois plus lent !).

Les équations des tendances sont les mêmes que sur les Figures 14-16 et n'ont pas été figurées sur la mise à l'échelle pour ne pas compliquer d'avantage la représentation.

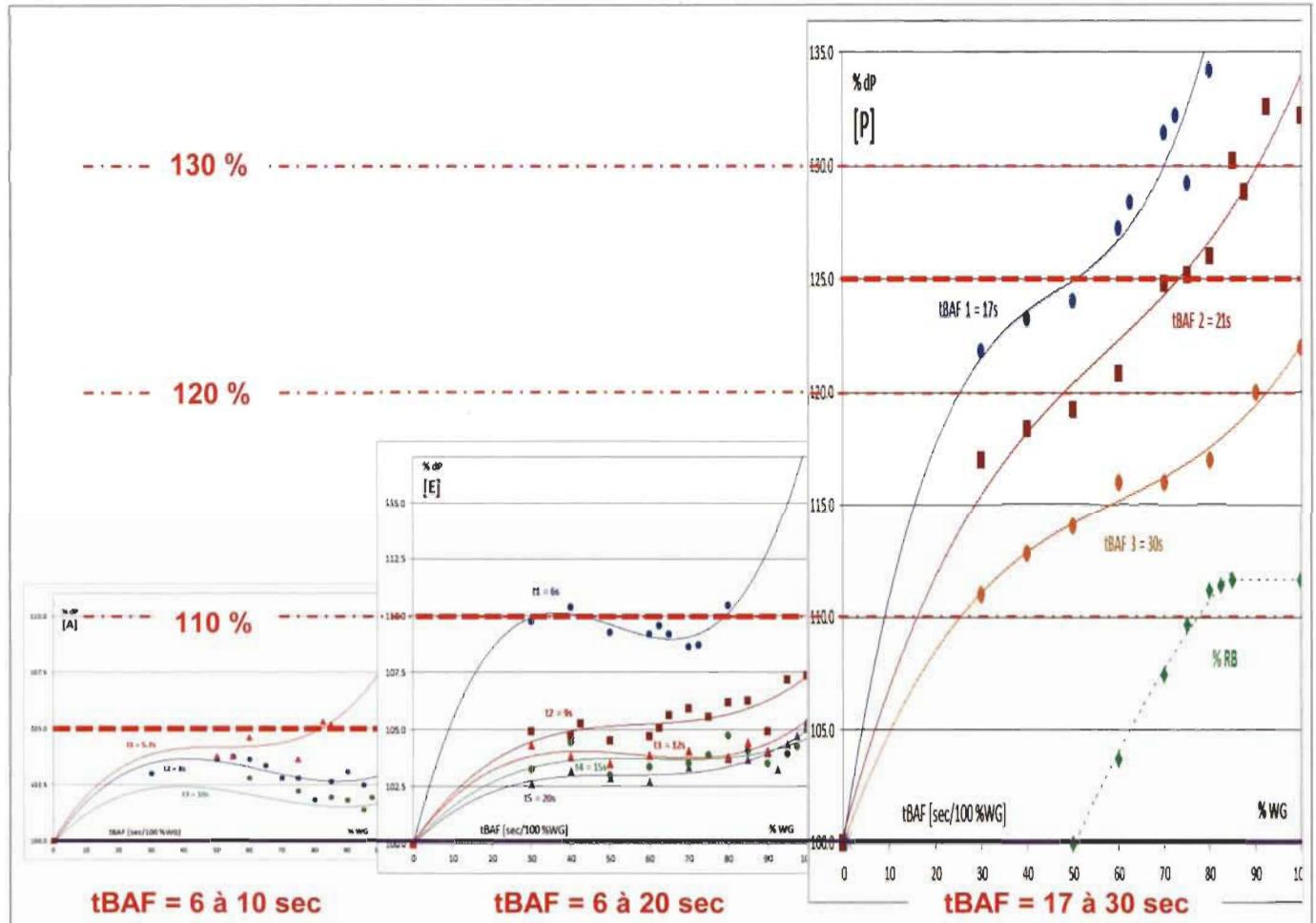


Figure 17 - Mise à l'échelle de l'évolution générale des surpressions %dP en fonction du %WG pour différents tBAF

4.3. Impact de la deuxième pente de fermeture des directrices

Des cas particuliers ont été analysés pour identifier l'origine du comportement inhabituel lors des rejets. Pour une turbine Kaplan de la centrale P, une défaillance accidentelle du circuit hydraulique du régulateur de vitesse, assurant la deuxième pente de fermeture du vannage, a provoqué une augmentation significative de la surpression dans la bâche spirale.

Pour deux tBAF différents, sur la Figure 18, est figurée la différence des résultats entre les fermetures par une pente rapide unique et une fermeture par pente rapide suivie d'une pente lente :

- ✓ Les lignes continues figurent les pressions obtenues avec une seconde pente agissant en bas du 45% WG;
- ✓ Les lignes en pointillés représentent l'augmentation de pression lorsque le circuit de la deuxième pente a été de façon intempestive hors service.

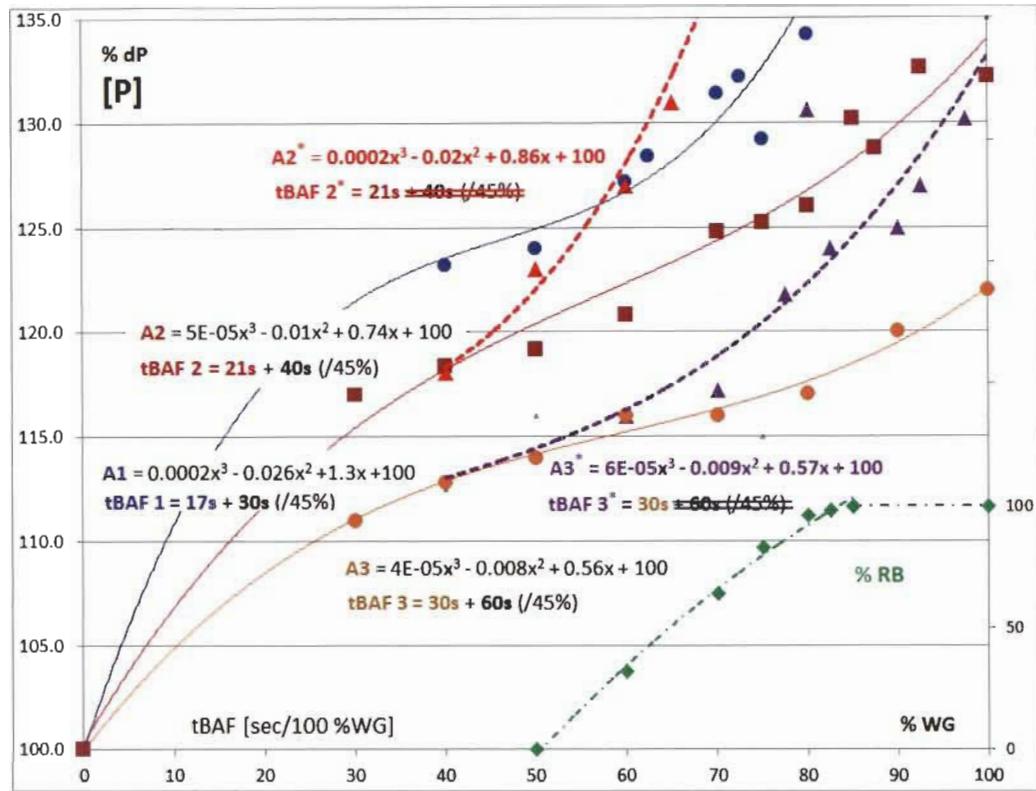


Figure 18 - Influence de la seconde pente pour différents tBAF d'une Kaplan (2017).

Basé sur des données expérimentales, il est facile de conclure que les surpressions sont influencées de façon importante par l'existence de fermeture sur une deuxième pente et implicitement par le gradient de cette pente, appelée communément fermeture lente du vannage (à ne pas confondre avec le cousinage des servomoteurs qui arrive vers la fin de la fermeture du mécanisme de vannage, les derniers 10 à 5 % habituellement).

Il est à noter que les surpressions sont influencées de façon importante par le taux d'une deuxième pente de fermeture lente du vannage. Deux constats importants sont à retenir :

- ✓ Plus le tBAF est rapide, plus l'influence de la deuxième pente est importante;
- ✓ Plus la deuxième pente est lente (correspondant à 40 voire même 60 secondes pour 100 % de vannage) plus l'atténuation de la montée en surpression est prononcée.

Ce constat nous autorise à lister la deuxième pente de fermeture du vannage parmi les facteurs importants d'influence pour la surpression.

4.4. Surpression en fermeture de la marche à vide

À la fin d'une séquence de fermeture complète en mode automatique d'une turbine Francis de la centrale [Y], une surpression importante a été observée dans la bâche.

Au début de la dernière étape de fermeture, à partir de la position de marche-à-vide (màv, environ 14 %WG) vers 0 %WG, la mise en mouvement des directrices ($tBAF = 6.7 \%WG/\text{seconde}$) a occasionné un pic de surpression dans la bâche proche de la valeur admissible.

Pour une Francis, la figure 19 montre une surpression importante à la fin d'une séquence d'arrêt identifiée par un « x » sur l'évolution de la pression. Le graphique présente également la position du vannage (WG), la vitesse de rotation du groupe (rpm), la puissance du groupe (MW) et la pression de référence lorsque les directrices sont fermées (Pref).

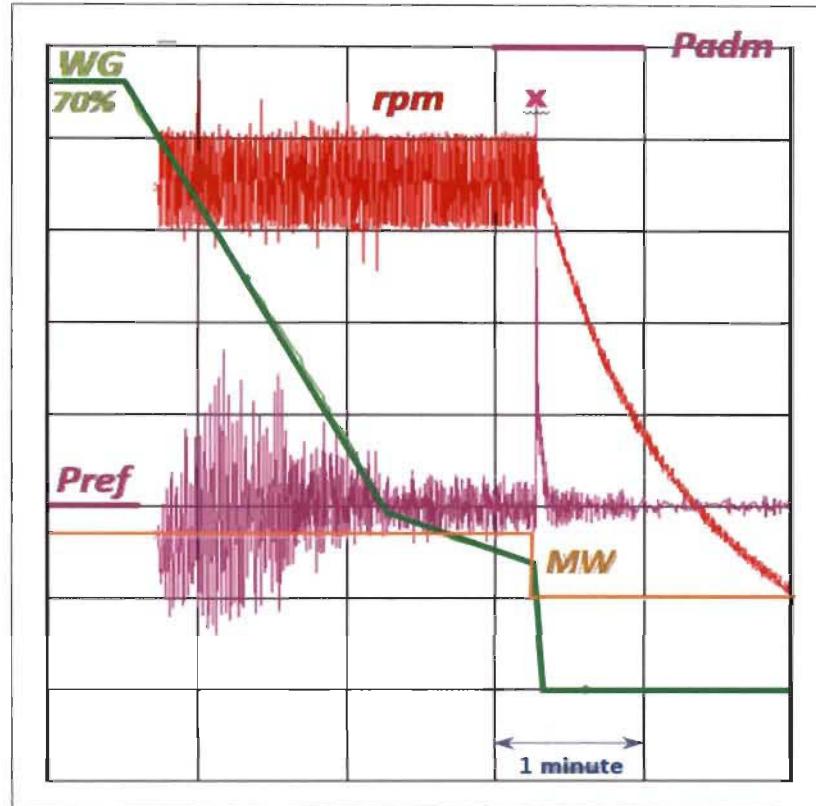


Figure 19 - Pic de surpression de la marche-à-vide dans la centrale électrique Y (2016).

L'analyse de cet évènement suggère que le débit n'est pas le seul facteur important provoquant l'augmentation de la surpression à l'intérieur du PHYDR.

4.5. Surpression en régulation de vitesse et fermeture

Lors du mouvement de vannage, pour assurer la régulation de vitesse du groupe en exploitation normale (RFP) ou encore pendant la variation de la puissance, des oscillations et des phénomènes d'instabilité se traduisent par des surpressions importantes dans le PHYDR. Un exemple de baisse de charge pour une turbine Francis de la centrale [Y] est illustré à la Figure 20 et

montre la variation des paramètres en régulation et les surpressions induites dans le PHYDR.

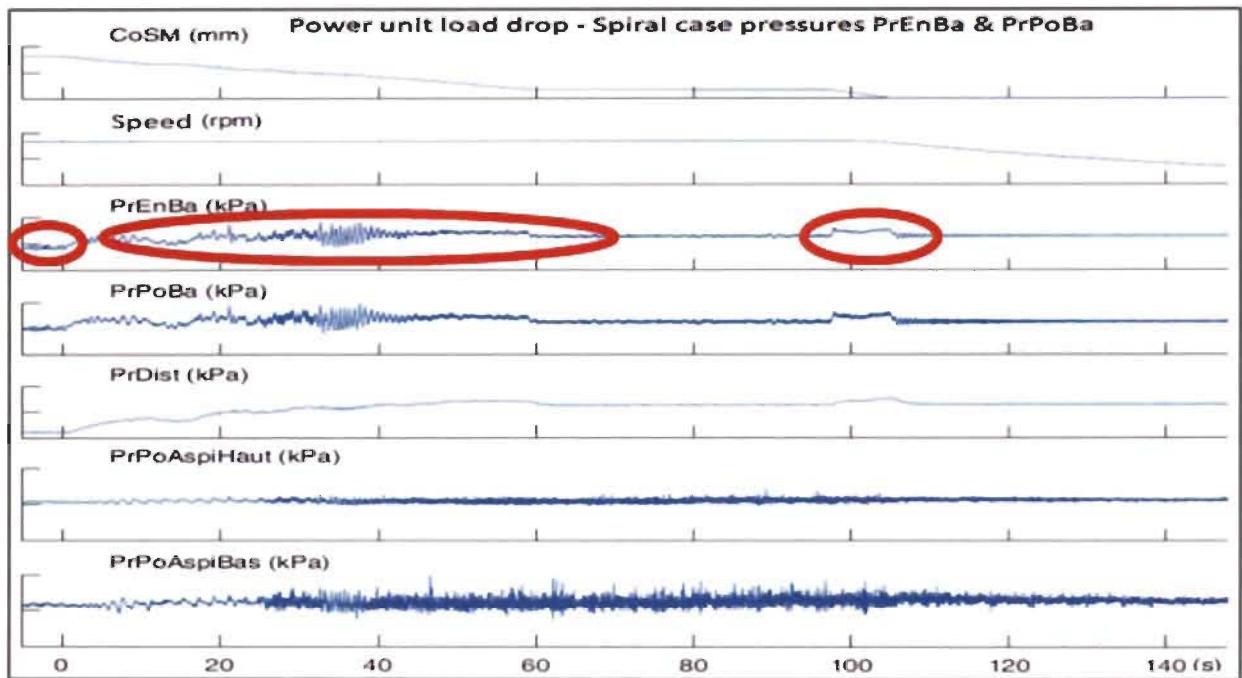


Figure 20 - Évolution des pressions dans le temps lors d'une baisse de charge pour une Francis dans la centrale Y (2019)

Les encerclés en rouge identifient les variations de pression mesurées par un capteur installé à l'entrée de la bâche spirale (PrEnBa) :

- ✓ Le premier, pour les fluctuations occasionnées par les mouvements de vannage en exploitation normale;
- ✓ Le deuxième, les oscillations pour la traversée de la zone transitoire lors d'une baisse de charge;
- ✓ Le troisième, lors d'une fermeture de la marche-à-vide à 0%WG sur une pente ralentie contrôlée par le régulateur de vitesse.

Le graphique présente également la position du vannage (CoSM), la vitesse de rotation du groupe (Speed), la pression mesurée à la porte de bâche (PrPoBa), la pression mesurée à l'avant-distributeur (PrDist), la pression mesurée en haut de la porte de l'aspirateur (PrPoAspiHaut) et la pression mesurée en bas de la porte de l'aspirateur (PrPoAspiBas).

On constate des surpressions importantes dans le PHYDR lors du fonctionnement normal, sans fermeture sur le temps rapide tBAF en délestages.

4.6. Analyse temporelle des interactions entre les facteurs

Selon le type de GTA, il existe une interaction dans le temps entre les valeurs mesurées :

- ✓ Surpressions;
- ✓ Taux de fermeture des directrices;
- ✓ Survitesse;
- ✓ Pressions/variations du vide dans l'aspirateur;
- ✓ Vitesse et accélération du groupe.

Sur la Figure 21, pour un rejet de charge d'une Francis à la centrale Y, le graphique présente l'évolution des paramètres dans le temps pour un rejet de charge, particulièrement pour la surpression dans la bâche, l'ouverture de vannage, le taux de fermeture du vannage, la vitesse de rotation, l'accélération

du groupe et la variation des pressions/dépressions dans l'aspirateur. On y observe que :

- ✓ Les pics de pression maximale dans la bâche spirale se produisent à 70 % pour la première fois et à 50 % une deuxième fois;
- ✓ La variation de pression dans l'aspirateur suit la survitesse de la roue;
- ✓ Le vide maximum dans l'aspirateur arrive avant le deuxième pic.

Nous faisons le constat que :

- ✓ Le premier pic est dû à une forte réduction du débit par les directrices;
- ✓ Le deuxième pic provient de l'instabilité induite dans l'écoulement de l'eau par la survitesse de la roue et les fluctuations de pression dans l'aspirateur.

Nous sommes en mesure de présumer/démontrer/constater que la roue en survitesse agit comme un orifice dynamique.

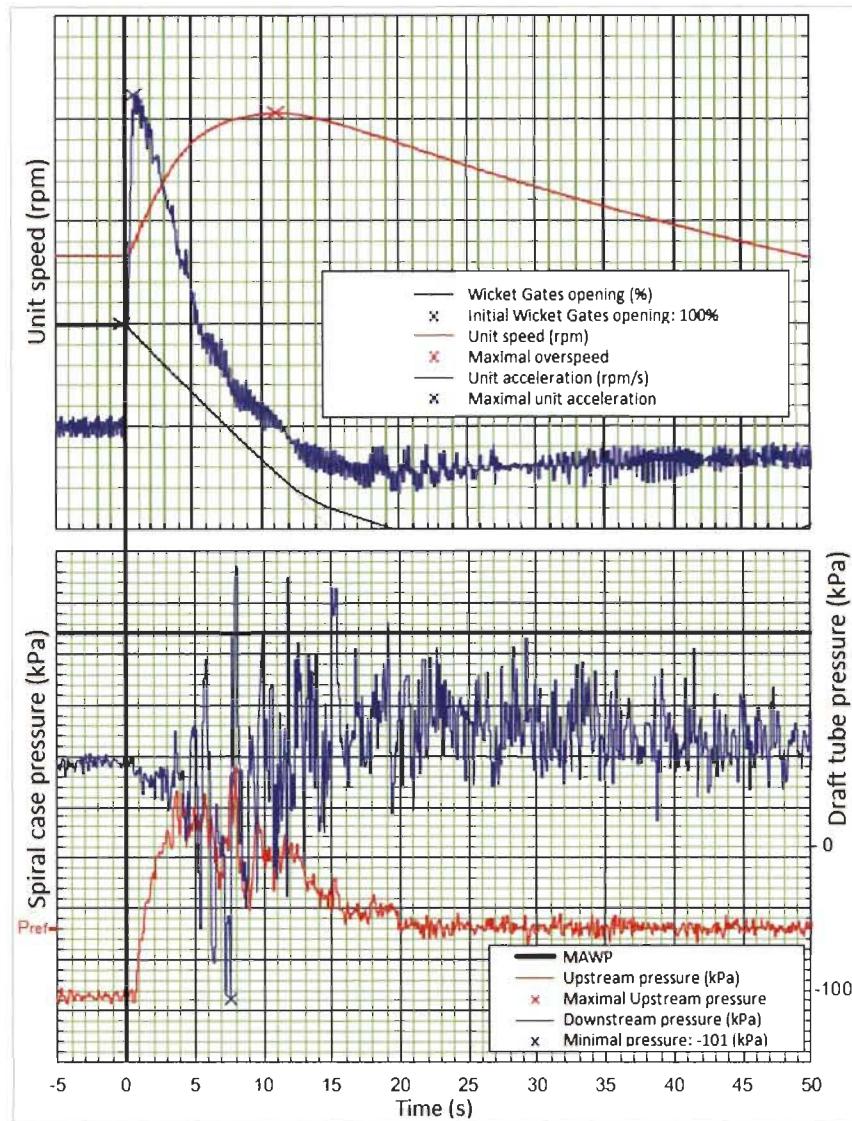


Figure 21 - Paramètres enregistrés lors d'un rejet de charge, d'une Francis de la centrale Y (2019).

Sur l'ensemble des observations faites lors des essais nous constatons que, dépendamment du type de GTA ainsi que du type de PHYDR, il y a une corrélation dans le temps entre les valeurs mesurées pour les paramètres à l'étude : la surpression dans le PHYDR, l'ouverture de vannage au moment de

l'activation de la séquence de protection, le taux de fermeture du vannage, la survitesse maximale du groupe ainsi que la variation des pressions et des dépressions dans l'aspirateur.

CHAPITRE 5 - DISCUSSIONS

La recherche a visé à identifier les facteurs qui contribuent au phénomène de coup de bélier, à établir leur influence et à contribuer à la formalisation de l'interaction entre le GTA et le PHYDR. L'analyse a été menée pour mieux comprendre les paramètres qui affectent les coups de bélier et les régimes transitoires, ce qui entraîne un stress supplémentaire pour le PHYDR. La portée de l'étude était de faire des recommandations pour faciliter la prise de décision pour une exploitation judicieuse des actifs.

L'étude de l'évolution de la pression et des tendances des valeurs de pressions lors des rejets de charge a été complétée. Généralement, il a été observé que les surpressions mesurées dans la zone transitoire sont relativement élevées. Pour les rejets de charge à l'ouverture maximale des directrices, cette tendance augmente les surpressions pour certains des GTA à faible chute et diminuent pour les GTA de grande chute. Ces comportements observés permettront de mieux orienter les modèles de calcul et d'aider à trouver les principaux facteurs à prendre en compte lors de la conception de PHYDR, ainsi que les paramètres à ajuster lors de la mise en service du GTA.

Un aperçu de l'influence des différents facteurs sur la surpression dans la bâche a été donné. Quelques enregistrements particuliers ont été effectués pour confirmer l'importance de certains facteurs d'influence.

Les paramètres des équations correspondantes restent à être confirmés. Une analyse plus approfondie reste à faire, afin de séparer clairement la contribution de chacun des facteurs.

Concernant l'analyse temporelle des facteurs d'influence de la surpression, un seul exemple très sommaire est évoqué. Pour rencontrer l'objectif sur les relations cause à effet et les préséances, il faudrait se pencher davantage sur les données enregistrées existantes.

Il reste aussi à faire la confrontation des résultats obtenus lors des essais avec les modèles théoriques.

Avec les remarques précédentes, nous considérons que les objectifs des expérimentations ont été atteints :

- ✓ Il a été validé que pour toutes les configurations des groupes existe un tBAF optimal pour assurer la balance entre la surpression et les autres facteurs, entre autres la survitesse de la partie tournante;
- ✓ Il existe toujours des mesures complémentaires pour améliorer les comportements, tels que la deuxième, pente, l'aération, etc.;
- ✓ Dans certains cas, une restriction en %WG maximale permise peut être imposée, de façon définitive ou temporaire, afin de respecter la pression admissible et de permettre l'exploitation sécuritaire du PHYDR.

L'impact des charges extrêmes sur l'équipement doit être traité en fonction du type de sollicitation, des conséquences et des risques encourus. Par la suite des mesures appropriées doivent être appliquées.

Les considérations pour la gestion des actifs devraient se concentrer sur l'adoption de solutions afin d'augmenter la durée de vie des équipements :

- ✓ Appliquer des modes de fonctionnement moins exigeants pour les GTA;
- ✓ Améliorer la maintenance existante;
- ✓ Diminuer les périodes d'arrêt planifiées ou inattendues.

Certaines mesures préventives sont nécessaires afin d'assurer un fonctionnement sécuritaire des installations et de diminuer les risques d'accident :

- ✓ Sécuriser les réglages critiques protégeant l'équipement des charges extrêmes;
- ✓ Reconsidérer les critères de conception des projets;
- ✓ Élaborer des stratégies de mise à niveau de l'équipement existant.

CHAPITRE 6 - CONCLUSIONS

L'objectif principal de l'étude, d'identifier les facteurs qui contribuent au phénomène de coup de bélier, a été rencontré. Une analyse par expérimentation pour les charges extrêmes occasionnées par des pics de surpressions a été faite. Une exploitation excessive du GTA entraîne des coups de bélier supplémentaires et des régimes transitoires avec un impact majeur sur la fiabilité et la disponibilité des équipements, ainsi que sur la sécurité en opération. Par les résultats obtenus, le travail présent pourrait contribuer aux recherches sur les sollicitations extrêmes et conséquemment à l'avancement des modèles et des simulations numériques.

La revue de littérature a permis d'identifier les facteurs ayant une contribution sur le coup de bélier dans le PHYDR. Parmi les variables indépendantes en lien avec la durée de vie des PHYDR, la pente de fermeture rapide tBAF des directrices du GTA est ressortie comme paramètre fondamental pour le coup de bélier.

Lors des essais effectués dans les 24 centrales d'Hydro-Québec, les efforts ont été concentrés sur l'influence que le mode opératoire du GTA, notamment le tBAF, peut avoir sur le coup de bélier et les phénomènes transitoires dans le PHYDR. Suite à l'analyse des données d'essais et du comportement dans des cas particuliers, il a été constaté que l'ensemble des composants hydrauliques du GTA agit comme un orifice dynamique et non comme une perte de charge

fixe, constante. Divers paramètres d'influence ont été identifiés et différentes interrelations entre ces facteurs ont été observées.

Pour le rejet de charge à l'ouverture maximale des directrices, cette tendance augmente pour certains des GTA à basse chute et diminue pour les GTA à haute chute. Les surpressions mesurées dans la zone transitoire sont relativement élevées.

Les comportements observés permettront d'améliorer les modèles de calcul et de trouver les principaux facteurs à prendre en compte lors de la conception des PHYDR, ainsi que les paramètres GTA à ajuster lors de la mise en service afin de réduire les sollicitations dans les PHYDR.

Il est important d'avoir une compréhension approfondie du phénomène des coups de bâlier, ce qui permet d'identifier les besoins des actifs et les problèmes en exploitation afin de recommander des modes de fonctionnement adaptés au groupe respectif. Des protocoles optimaux d'opération du GTA permettront de prolonger la durée de vie des actifs (GTA et PHYDR).

Une bonne gestion des actifs maximisera les revenus, réduira les coûts et assurera la sécurité. La prise en compte de recommandations spécifiques aura des effets immédiats à long terme sur la fiabilité des équipements et les avantages opérationnels :

- ✓ Pour les réfections ou les nouveaux projets, considérer le fonctionnement envisagé en avant-projet/ business-case, ainsi que les exigences du réseau;

- ✓ Adopter une stratégie de maintenance proactive, adaptée à la réalité des contraintes/sollicitations;
- ✓ Faire de la surveillance et des inspections périodiques afin d'intercepter les dégradations.

L'inaction dans certains cas peut avoir un effet dramatique sur le fonctionnement sûr de l'équipement :

- ✓ Valider la valeur tBAF pour éviter une surpression inattendue;
- ✓ Sécuriser le circuit hydraulique du régulateur de vitesse pour éviter un désajustement accidentel du tBAF;
- ✓ Installer une deuxième pente à fermeture lente;
- ✓ Confirmer la vraie pression admissible pour le PHYDR en fonction de la dégradation réelle de l'équipement;
- ✓ À la mise en service, régler correctement les paramètres critiques (tBAF, survitesse) et en faire la mention sur les documents « tels que construits ».

Les comportements observés permettront d'améliorer les modèles de calcul avancés et de trouver :

- ✓ Les principaux facteurs à prendre en compte lors de la conception des passages hydrauliques;
- ✓ Les paramètres à régler lors de la mise en service.

Un modèle hydraulique plus précis permettra aussi de justifier les mesures proposées en termes de gestion des actifs, pour assurer un service sûr de la mise en service à la fin du cycle de vie des équipements.

CHAPITRE 7 - RECOMMANDATIONS

Vu la complexité des phénomènes du coup de bélier et transitoires il reste toujours de la place pour des améliorations futures. Tel qu'annoncé dans le préambule, il serait approprié de consolider, par les démarches futures, les objectifs secondaires en lien avec les projets en déroulement chez Hydro-Québec, IREQ ou d'autres, en collaboration avec l'UQTR :

- ✓ Méthode AMD des PHYDR (projet GIMC d'Hydro-Québec);
- ✓ Modélisations et simulations numériques des transitoires (projet THAUR d'IREQ);
- ✓ Modèles adaptés des PHYDR (projet JUMEAUX NUMÉRIQUES d'IREQ);
- ✓ Modèle numérique du comportement hydraulique avec perte de charge de type « orifice variable » (logiciel SIMSEN);
- ✓ Recommandations pour une gestion efficace des actifs (projet GDA d'Hydro-Québec et de l'UQTR).

Afin de rencontrer ces objectifs, nous préconisons de guider le travail à venir sur deux axes principaux : poursuivre l'analyse des sollicitations et faire des considérations GDA sur l'impact des charges extrêmes.

Sur le premier axe, nous recommandons de poursuivre les efforts portant sur l'avancement des connaissances dans le domaine des sollicitations extrêmes :

- ✓ Validations théoriques par calculs et programmes de simulation;
- ✓ Complément expérimental sur banc d'essai;
- ✓ Validation des conclusions avec des essais dans les centrales d'un autre producteur;
- ✓ Confirmation des cas particuliers observés lors des essais.

L'objectif principal des essais complémentaires serait d'investiguer l'influence sur le coup de bâlier des paramètres suivants :

- ✓ La survitesse de la partie tournante;
- ✓ Type de déclenchement (rapide ou lent, baisse de puissance);
- ✓ Tendance du couple hydraulique sur les directrices sur la plage de déclenchement;
- ✓ Taux de fermeture lente de la deuxième pente de fermeture des directrices;
- ✓ %WG du début de la fermeture lente par la deuxième pente des directrices;
- ✓ Bénéfice éventuel d'une troisième pente de fermeture lente;
- ✓ Possibilité d'avoir une fermeture modulée par le régulateur de vitesse électronique (dans les cas applicables);
- ✓ Temps de fermeture des pales;
- ✓ Came de conjugaisons directrices / pales pour les Kaplans;

- ✓ Comportement en survitesse d'une roue avec tendance d'accélérer l'écoulement (pompage volumétrique);
- ✓ Comportement en survitesse d'une roue avec tendance de ralentir l'écoulement (perte de charge de type « mur d'eau »);
- ✓ Vitesse de l'écoulement de l'eau versus la vitesse de fermeture des directrices;
- ✓ Débit effectif établi dans le passage hydraulique au moment du déclenchement;
- ✓ Angle des directrices au moment du déclenchement/coup de bâlier (orientation du jet d'eau vers le bord d'attaque des pales);
- ✓ Angle des pales au moment du déclenchement pour les Kaplans (réception du jet d'eau);
- ✓ Aération de l'écoulement dans l'aspirateur;
- ✓ Cheminée d'équilibre;
- ✓ Mode de commande contrôle du groupe en exploitation normale (régulation de vitesse en exploitation, rôle et paramètres du régulateur lors des séquences d'arrêt/démarrage, réaction du régulateur sous commande des protections);
- ✓ Mode d'exploitation du groupe dicté par la demande du réseau (en consigne de position de vannage, en RFP/équilibrage, en pointe).

Sur le deuxième axe, il est également important de justifier les mesures GDA requises dans le contexte des sollicitations extrêmes afin d'assurer la fiabilité ainsi que la disponibilité des équipements, de prévenir les accidents et de garantir un service sécuritaire de la mise en service à la fin du cycle de vie du GTA et du PHYDR. Des conclusions doivent être tirées sur l'impact des charges extrêmes sur les équipements soumis à des surpressions (bâche spirale, conduite d'amenée, rotor, directrices, avant-directrices, fonds, aspirateur), notamment dans les conditions actuelles lors de l'utilisation des GTA en équilibrage de réseau.

La mise en pratique des mesures consistera dans l'élaboration des procédures et protocoles GDA à considérer tant pour les GTA que pour les PHYDR pour :

- ✓ Les critères de conception;
- ✓ Les mises en service;
- ✓ Le monitoring;
- ✓ La maintenance.

Dans un premier temps, il faudrait faire le choix des mesures requises compte tenu des charges et en fonction de l'état de dégradation dans lequel se trouve l'équipement :

- ✓ Établir la causalité entre les charges et les effets;
- ✓ Définition des régimes les plus dangereux: LCF initie et HCF propage la fissure;

- ✓ Compléter une grille des mesures d'amélioration basée sur le modèle illustré à la Figure 22.

| Solicitations | Paramètres de conception | normaux | diminués | dégradés |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | MAINTENANCE | MAINTENANCE SÉCURITÉ | MAINTENANCE SÉCURITÉ |
| normales | MAINTENANCE SÉCURITÉ | MAINTENANCE SÉCURITÉ | MAINTENANCE SÉCURITÉ | MAINTENANCE SÉCURITÉ |
| maximales | MAINTENANCE SÉCURITÉ | MAINTENANCE SÉCURITÉ | MAINTENANCE SÉCURITÉ | MAINTENANCE SÉCURITÉ |
| exceptionnelles | MAINTENANCE SÉCURITÉ | MAINTENANCE SÉCURITÉ | MAINTENANCE SÉCURITÉ | RÉFLECTION |

Figure 22 - Grille des mesures d'amélioration.

Dans un deuxième temps, il faudrait observer les mesures pour assurer la sécurité en opération des installations :

- ✓ Valider les réglages dans le régulateur de vitesse (loi de fermeture dans le régleur);
- ✓ Réviser les critères de conception.

Troisièmement, en collaboration avec l'industrie hydroélectrique (fabricants et concepteurs), faire des recommandations pour augmenter la durée de vie :

- ✓ Établir les indicateurs clés pour mesurer la performance (ex. : heures d'indisponibilité / heures d'opération);
- ✓ Améliorer la maintenance existante;
- ✓ Élaborer des stratégies pour les réfections.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Bouchayer A. (1902). Établissement des conduites forces. *La Houille Blanche n° 8, France.*
- Bouchayer A. (1911). Des ruptures dans les conduites. *La Houille Blanche n° 3, France.*
- Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior. (1977). Welded Steel Penstock. *Engineering Monograph No. 3.*
- Dollon Q. (2019). Identification des caractéristiques du comportement dynamique des roues GTA par l'étude des régimes transitoires. *Devis de Recherche - DGA1033, ETS, Montréal, Canada.*
- Doolittle H. L. et Davis A. (1927). Effect of speed regulation and water hammer on the design of relief valves, penstocks and surge tanks. *Hydraulic Power Committee, National Electric Light Association, No 267-76, USA.*
- Dreyer M., Nicolet C., Gaspoz A., Biner D., Rey-Mermet S., Saillen C. et Boulicaut B. (2019). Digital clone for penstock fatigue monitoring. *IAHR International Workshop on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery, University of Stuttgart.*
- Ghidaoui M.S., Zhao M., McInnis D.A. et Axworthy D.H. (2005). A review of water hammer theory and practice. *Applied Mechanics Reviews ASME, Volume 58.*
- Huanhuan L., Diyi C., Xinguang Z. et Yonghong W. (2016). Dynamic analysis and modelling of a Francis in the load rejection transient. *The Institution of Engineering and Technology Journals, IET Renewable Power Generation.*
- International Energy Agency, OECD/IEA. (2020). World Energy Outlook 2020. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf>
- Le Comte de Sparr. (1919). L'étude des coups de bâlier. *La Houille Blanche n° 3, France.* dx.doi.org/10.1051/lhb/1919004.
- Lupa S-I., Gagnon M. et Abdul-Nour G. (2021). Water Hammer Interaction Between Hydraulic Power Generators and Hydraulic Passages. *World Congress on Engineering Asset Management -15th WCEAM, Paper 048, Bonito, Brasil.*

Marcus Vitruvius Pollio, translated by Morris Hicky Morgan. (1914). *The Ten Books on Architecture*. Cambridge, Harvard University Press, Book VIII, Chapter VI, sections 5-8.

Nicolet C., Dreyer M., Béguin A., Bollaert E., Torrent S. et Dayer J.-D. (2018). Hydraulic Transient Survey at Cleuson-Dixence with Real-Time Hydro-Clone Monitoring System. *International Journal of Hydropower & Dams, Gdansk, Poland*.

Parmakian J. (1963). Waterhammer analysis. Dover Publications, inc., New York.

Ramos H.M. et Almeida A.B. (2001). Dynamic orifice model on waterhammer analysis of high or medium heads of small hydropower schemes. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 39, no 4, pag 429-436.

Ramos H.M. (2010). Special Concerns Related to the Runaway Effect in Francis Turbines. *Hydro Review Issue 5, Volume 18, HYDROVISION International*.

Selz A. (1986). Recertification of pressure vessels. *Journal of Pressure Vessel Technology, ASME Pressure Vessels and Piping Division, Vol 108*.

Wencheng G. et Daoyi Z. (2018). A Review of the Transient Process and Control for a Hydropower Station with a Super Long Headrace Tunnel. *MDPI Energies* No 2994.

Xiaoqin L., Jinshi C. et Peng C. (2013). Wicket gate closure control law to improve the transient of a water turbine. *Thermal, Power and Electrical Engineering revue, Trans Tech Publications, Switzerland*. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.732-733.451.

Zheng T., Tian Z., Gui S., Li J. et Zou H. (2014). Hydraulic transient process research technology and engineering application on the complex water tunnel conveyance system of hydropower station. *ISFMFE - 6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering*.

APPENDICE A***MATRICE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE***

Matrice complète de la Revue de littérature

| Article | Objectif | Méthodologie | Hypothèses | VARIABLE DÉPENDANTE : Durée de vie des PHYDR | Conclusions |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | VARIABLES INDEPENDANTES | |
| [1] Établissement des conduites forces Bouchayer A La Houille Blanche n° 8 France décembre 1902 | Faire une revue des premières conduites forcées et rappeler les principes de calcul | Revue des théories, des concepts, Analyse de cas particulier. | Les facteurs d'influence sur la durée de vie (DdV) des PHYDR identifiés après les premières 65 ans d'expérience avec les conduites forces restent dans le domaine de la résistance des matériaux classique. Le domaine serait bien maîtrisé et ne nécessiterait que des formules plutôt simples | 5 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 2 = dégradation de la Pconception d'origine VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = Impact des sollicitations uniques sur DdV | <ul style="list-style-type: none"> en 1902 : abord simpliste de la conception des PHYDR, toutes les formules sont mentionnées comme "très simples" le temps de fermeture des directives GTA qui un facteur critique/majeur pour le coup de bâlier est calculé par une formule "très simple". pas de calcul du trajet hydraulique PHYDR, seulement simpliste du débit pour l'épaisseur de la paroi à l'époque il y avait plutôt des grands consommateurs qui pourraient facilement provoquer des rejets de charge dans les réseaux isolés existants la dégradation de la Pconception d'origine dans le temps n'est influencée que par oxydation et de plus, depuis 20 ans, ce phénomène serait sous contrôle / sans inquiétude (reprendre aux 3-4 ans) l'impact des sollicitations cycliques ou par fatigue sur n'est pas du tout pris en compte = lacune à l'époque |
| [2] Waterhammer analysis Pamukian J. Dover Publications, Inc. New York aout 1963 | Élaborer la théorie qui entoure le phénomène de coup de bâlier dans les PHYDR | Revue de littérature, des théories, des concepts | Les équations de base de la mécanique des fluides sont applicables pour les PHYDR des GTA en utilisant les limitations et les scénarios appropriés. | 5 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = Impact des sollicitations uniques sur DdV VI 6 = Impact des sollicitations cycliques sur DdV | <ul style="list-style-type: none"> en 1963 les théories et équations se trouvent plus raffinées, les hypothèses sont bien précisées et les conditions limite mieux définies on y voit apparaître une préoccupation pour les sollicitations cycliques / fatigue qui commence à concerner les concepteurs des équipements / mesures d'atténuation des coups de bâlier sont proposées (cheminée d'équilibre, chambre / accumulateurs à air) l'impact des sollicitations cycliques ou par fatigue sur n'est pas du tout pris en compte = lacune à l'époque la modélisation de la coupure par les directives pas raffinée = lacune l'influence des temps de fermeture sur la survie de la partie tournaire pas considérée = lacune |
| [3] A review of water hammer theory and practice Ghoshal M.S., Zhao M., McInnis D.A., Awbery D.H. Applied Mechanics Reviews ASME Volume 58 janvier 2005 | Faire un recueil des théories et modèles avec leurs limitations et hypothèses de calcul | Revue de littérature, évolution des théories, des concepts | Les modèles doivent être paramétrables et validés par la pratique | 5 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 5 = Impact des sollicitations uniques sur DdV VI 6 = Impact des sollicitations cycliques | <ul style="list-style-type: none"> une mise à jour utile et indispensable pour identifier les directions de recherche / amélioration dans le domaine des coups de bâlier une liste des logiciels de calculs existants dans le domaine est faite (incluant la description du champ d'application, les modèles utilisés, les points forts de chacun) adaptation pour le cas particulier des PHYDR et GTA serait à faire |
| [4] Dynamic analysis and modelling of a Francis in the load rejection transient Huaihuan L., Duy C., Xinguang. The Institution of Engineering and Technology Journals, juin 2016 | Proposer un modèle mathématique pour le comportement d'un GTA en rejet de charge | Article de recherche | En délestage, le GTA induit une sollicitation de coup de bâlier sur la PHYDR par le modèle d'impact élastique | 4 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = Impact des sollicitations uniques sur DdV VI 6 = Impact des sollicitations cycliques sur DdV | <ul style="list-style-type: none"> le modèle mathématique proposé pour le GTA est très élaboré, de type dynamique et non linéaire, incluant <ul style="list-style-type: none"> modélisation globale de la perte turbine pour une Francis modélisation de l'alternateur, modélisation du régulateur vitesse modélisation du couple résultant en fonction de l'ouverture des directives équations des coefficients de transfert non-linéaires (6) pour raffiner la modélisation e la stabilité du GTA issue de l'analyse du modèle peut être améliorée par une optimisation de la loi de fermeture des directives. |
| [5] Dynamic orifice model on waterhammer analysis of high or medium heads of small hydropower schemes Ramos H.M., Almeida A.B. Journal of Hydraulic Research, octobre 2001 | Introduire un modèle dynamique du coup de bâlier pour les turbines à réaction, surtout avec des conduites longues | Article de recherche Revue de littérature, des théories, des concepts | Le coup de bâlier est influencé par la vitesse / survie de la roue | 4 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = Impact des sollicitations uniques sur DdV | <ul style="list-style-type: none"> une approche nouvelle basée sur le concept d'un orifice dynamique équivalent a été développé pour modéliser le coup de bâlier provoqué par le GTA. |
| [6] Special Concerns Related to the Runaway Effect in Francis Turbines Ramos H.M. Hydro Review Issue 5, Vol 18 HYDROVISION International novembre 2010 | Proposer un modèle mathématique du coup de bâlier pour le calcul préliminaire des turbines à réaction (Francis) | Article de recherche Revue de littérature, des théories, des concepts Opinion des experts | Le coup de bâlier est influencé par la vitesse / survie de la roue | 5 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = Impact des sollicitations uniques sur DdV VI 6 = Impact des sollicitations cycliques sur DdV | <ul style="list-style-type: none"> la roue en survieuse agit comme un orifice dynamique et non fixe/constant. |
| [7] Welded Steel Penstock Bureau of Reclamation United States Department of the Interior Engineering Monograph No. 3 1977 | Fait la synthèse des critères de conception des passages hydrauliques en acier soudé sur 40 ans d'expérience | Revue de littérature, des théories, des concepts | Les PHYDR doivent remplir simultanément les deux fonctions de base <ul style="list-style-type: none"> assurer un débit et un trajet hydraulique optimal répondre aux sollicitations mécaniques lors de l'opération. | 5 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = Impact des sollicitations uniques sur DdV VI 6 = Impact des sollicitations cycliques sur DdV | <ul style="list-style-type: none"> les PHYDR doivent être sécuritaires afin de prévenir les défaillances les PHYDR construites en acier soudé doivent être en accord avec le Code ASME Section VIII. |
| [8] Hydraulic transient process research technology and engineering application on the complex water tunnel conveyance system of hydropower station Zheng T., Han Z., Gui S., Li J., ISFME - 6th International octobre 2014 | Proposer un modèle d'interaction en régime transitoire pour les très grandes PHYDR et GTA | Revue de littérature, des concepts Analyse de cas pour Trais Génies (700 MW, 980 m ³ s) | La modélisation convenable du trajet hydraulique peut éliminer les effets indésirables en régime transitoire | 5 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = Impact des sollicitations uniques sur DdV VI 6 = Impact des sollicitations cycliques sur DdV | <ul style="list-style-type: none"> un arrangement avec tube aspirateur optimisé a permis d'éliminer la chambre d'équilibre les prédictions du modèle utilisé ont été confirmées avec des observations expérimentales le temps de fermeture des directives, les ajustements du régulateur de vitesse et les séquences d'arrêt/démarrage du groupe ont été améliorée aussi. |
| [9] Hydraulic Transient Survey at Cleuson-Dixence Nicollet C., Dreyer M., Béguin A., Journal of Hydropower & Dams, Gdańsk, octobre 2018 | Valider une méthode "Hydro-Clone / SIMSEN" de simulation en temps réel pour moniturer le PHYDR. | Article de recherche, Analyse de cas particulier pour Cleuson-Dixence | Le phénomène de coup de bâlier, ainsi que la fatigue peuvent être simulés et reproduits en temps réel par modélisation numérique afin de prévenir l'endommagement du PHYDR | 3 variables indépendantes: VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 6 = Impact des sollicitations cycliques sur DdV | <ul style="list-style-type: none"> la conduite forcée de la centrale avait subi une rupture catastrophique en décembre 2000. le système de monitoring est fiable, mature et permet la surveillance des phénomènes transitoires le système est fiable, mature et permet la surveillance des phénomènes transitoires 8 mois d'utilisation en continu du système proposé ont permis de conclure que l'approche est un succès |

| Article | Objectif | Méthodologie | Hypothèses | VARIABLE DÉPENDANTE : Durée de vie des PHYDR | Conclusions |
|---|---|---|---|--|--|
| | | | | VARIABLES INDEPENDANTES | |
| [10] Digital clone for penstock fatigue monitoring Dreyer M., Nicolet C., Gaspoz A., IAHR International Workshop on Cavitation and Dynamic Problems, University of Stuttgart 9 octobre 2019 | Valider une méthode de numérisation "Hydro-Clone / SIMSEN" permettant de reproduire les dommages occasionnés par l'exploitation flexible / en peaking sur les PHYDR | Article de recherche Analyse de cas particulier pour La Bâtie, 200 MW, Pelton | | 4 variables indépendantes VI 1 = critères de conception VI 2 = dégradation de la Pconception d'origine VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = impact des sollicitations cycliques sur DdV | - les mesures ont démontré que les prédictions du modèle concordent avec la réalité. - il y a une concordance directe entre les variations des pressions transitoires et les sollicitations auxquelles le PHYDR est soumis. - dans le scénario d'exploitation flexible / en peaking, le taux d'usure du PHYDR est 10 fois plus élevé qu'en exploitation normale / de base. |
| [11] Des ruptures dans les conduites Bouchayer A. La Houille Blanche n° 3 France mars 1911 | Faire un suivi de son article publié en 1902, en référence [1] ci- haut | Revue des théories, des concepts. Analyse de cas particuliers. | L'ensemble des facteurs qui influencent la fiabilité des PHYDR doit être considérée à la conception | 4 variables indépendantes. VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = impact des sollicitations uniques sur DdV | - les critères de conception, les matériaux, les méthodes de fabrication et les essais ont un rôle important dans la durée de vie du PHYDR. - en 1911 l'abord est moins simpliste, les formules en référence sont plus élaborées. - les enregistrements obtenus avec les enregistreurs recommandés dans le passé ont été très utiles pour identifier les causes de ruptures de conduite |
| [12] L'étude des coups de bâlier Le Comte de Sparre La Houille Blanche n° 3 dx.doi.org/10.1051/lhb/1919004 France février 1919 | Présente les avancements dans le domaine pendant la première guerre mondiale. | Revue des théories, des concepts. Analyse de cas particuliers. | L'ensemble des facteurs qui influencent la fiabilité des PHYDR doit être considérée à la conception | 5 variables indépendantes VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = impact des sollicitations uniques sur DdV VI 6 = impact des sollicitations cycliques sur DdV | - introduit la notion de loi de fermeture non linéaire pour le vannage - présente la validation expérimentale des théories et des calculs - considère la notion d'épaisseur variable de la paroi de la conduite - les phénomènes de résonance sont mentionnés. |
| [13] A Review of the Transient Processes and Control for a Hydropower Station with a Super Long Headrace Tunnel Wencheng Guo and Daoyi Zhu MDPI Energies No 2994, novembre 2018 | Proposer un modèle d'interaction en régime transitoire pour les PHYDR super longues et GTA. | Revue des théories, des concepts. Analyse de cas particulier. | Les régimes transitoires du GTA sont influencés par la longueur de la conduite forcée. | 5 variables indépendantes VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = impact des sollicitations uniques sur DdV VI 6 = impact des sollicitations cycliques sur DdV | - le phénomène des transitoires pour les conduites forcées super longues est très complexe. - dans ce cas de figure, la configuration de la cheminée d'équilibre influence les transitoires encore plus que la loi de fermeture du vannage. - la régulation de vitesse du GTA est aussi à considérer dans le phénomène. |
| [14] Wicket gate closure control law to improve the transient of a water turbine Xiaomin Li, Jiming Cheng, Peng Chen Thermal, Power and Electrical Engineering review, Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/A MR.732-733 451 août 2013 | Présenter les résultats obtenus avec une loi de fermeture à pente multiples et directrices désynchronisées | Revue des théories, des concepts. Analyse de cas particulier Tianhuangping | La loi de fermeture des directrices influence les sollicitations induites lors des rejets de charge | 3 variables indépendantes VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = impact des sollicitations uniques sur DdV | - deux directrices qui ferment de façon asynchrone améliorent le comportement du GTA et des sollicitations en coup de bâlier lors des débâtements. - l'utilisation d'une loi de fermeture à pente multiples diminue les sollicitations. - le meilleur résultat a été obtenu avec deux directrices qui ferment de façon asynchrone des lois de fermeture à pente multiples pour les deux organes. |
| [15] Effect of speed regulation and water hammer on the design of relief valves, penstocks and surge tanks Doolittle H. L., Davis A. Hydraulic Power Committee, National Electric Light Association, No 267-76, USA août 1927 | Faire une revue des conduites forcées en service | Revue des théories, des concepts. Analyse de plusieurs cas particuliers. | En débâtement, le GTA est le principal facteur qui contrôle la sollicitation par coup de bâlier sur le PHYDR | 4 variables indépendantes VI 1 = critères de conception VI 3 = modélisation de l'écoulement par PHYDR VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = impact des sollicitations uniques sur DdV | - rappelle les hypothèses de calcul et les principes de calcul pour le coup de bâlier. - mettent l'emphasis sur l'importance de la conception adéquate de la conduite forcée, surtout le choix de la Pconception - énumère le rôle et la participation des équipements de protection, tel que les soupapes de surpression. |
| [16] Recertification of pressure vessels Seitz A. Journal of Pressure Vessel Technology, ASME Pressure Vessels and Piping Division, Vol 108 novembre 1986 | Encadrer la réqualification des vaisseaux sous pression selon les stratégies et méthodes ASME. | Revue des théories, des concepts | La réqualification des vaisseaux sous pression pour des valeurs inférieures de la pression admissible d'origine devient intéressante en fin de la durée de vie utile des équipements. | 2 variables indépendantes VI 1 = critères de conception VI 2 = dégradation de la Pconception d'origine | - les concepteurs doivent être préparés car il existe de fortes incitations économiques et de sécurité pour la réqualification des vaisseaux sous pression. - il a été vérifié que les coûts de réqualification à la fin de la durée de vie utilise se situent entre 10 et 15 % du coût de remplacement. - présentement, il n'y a de règles spécifiques, mais basé sur les normes existantes des méthodes doivent être développées à cet effet. - les étapes à suivre pour la réqualification sont : 1) recueillir des informations sur la conception et les conditions d'opération 2) effectuer une analyse de base pour établir la pression de service maximale admissible et pour identifier les zones à forte sollicitation 3) effectuer des inspections visuelles et des examens non destructifs 4) faire une analyse détaillée pour confirmer la pression maximale admissible actuellement 5) établir l'intervalle recommandé pour les inspections futures |
| [17] Identification des caractéristiques du comportement dynamique des roues GTA par l'étude des régimes transitoires Dollar Q Défis de Recherche - DGA1033 ETS, Montréal 2019 | Présenté comme exigence partielle à l'obtention du doctorat en génie mécanique PhD | Revue des théories, des concepts. Expérimentation | Le comportement dynamique de la turbine influence la structure de base, y compris le PHYDR | 4 variables indépendantes VI 1 = critères de conception VI 4 = modélisation du coup de bâlier par GTA VI 5 = impact des sollicitations uniques sur DdV VI 6 = impact des sollicitations cycliques sur DdV | - démontre que les régimes transitoires contiennent une information fréquemment exploitables et convertibles en propriétés modèles ou structurales. - établit une cartographie des phénomènes d'excitation, en fonction de la configuration de la machine et de la zone à l'étude. - définit une procédure fiable et automatique de détection et d'identification modale adaptée au cas des régimes transitoires. - considère la possibilité d'extraire des paramètres structuraux (masse, amortissement ou rigidité ajoutée) ou des paramètres modaux (déformation, pulsation, coefficient d'amortissement). - valide la cohérence entre les résultats expérimentaux et numériques. - suggère une méthode permettant de prédire un type d'essai idéal pour la caractérisation, afin d'optimiser la dégradation / temps d'immobilisation de la turbine et la quantité d'information modale |

APPENDICE B
NOTIONS TECHNIQUES
SUR LES PHYDR, LES GTA ET LA TENUE DES ESSAIS

NOTIONS TECHNIQUES SUR LES PHYDR, LES GTA ET LA TENUE DES ESSAIS

1. TYPES DE PHYDR RENCONTRÉS LORS DES ESSAIS

Différents types de PHYDR ont été rencontrés lors de la campagne d'essais :

- Longues ou courtes;
- De basse ou de haute chute;
- Creusé dans le roc ou externe.

De point de vue de l'impact des sollicitations sur le matériel des parois, les PHYDR peuvent être classifiés :

- Bétonnés;
- Métalliques (mécano-soudés ou rivetés).

Généralement, un PHYDR est composé de :

- La partie qui amène l'eau de l'amont de la rivière vers la turbine (conduites d'amenée);
- La section qui distribue de façon uniforme le débit à l'entrée de la turbine (bâche spirale);
- La partie qui évacue l'eau de la sortie de la turbine vers l'aval de la rivière (tube aspirateur).

Les diverses configurations pour les éléments constitutifs des PHYDR sont illustrées à titre informatif par la suite.

1.1 Conduites d'amenée

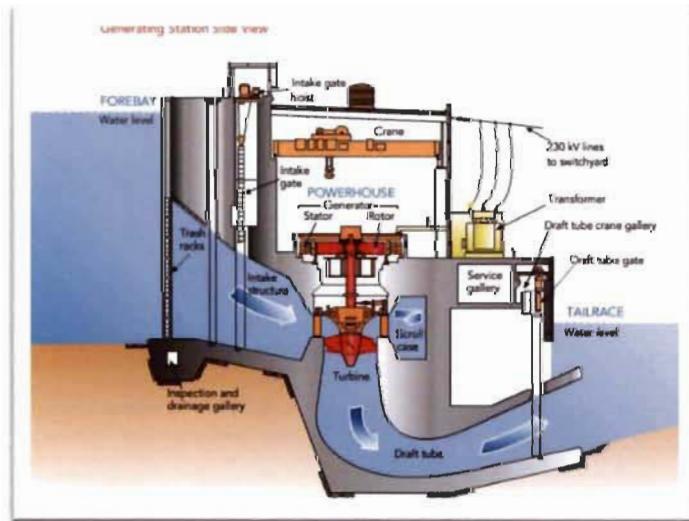


Figure 1.1.1 Conduite courte, de basse chute, coulée directement dans le massif de béton du barrage et de la centrale [image de : Manitoba Hydro. (2021). *Producing electricity*. <https://www.hydro.mb.ca/corporate/teachers/producing-electricity/>].

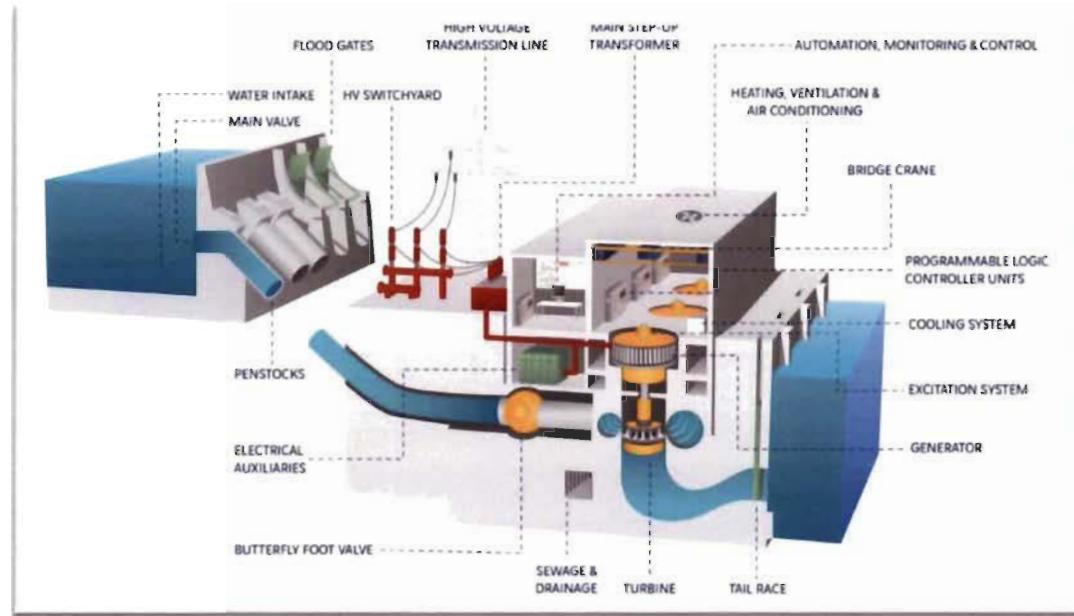


Figure 1.1.2 Conduite moyenne ou longue, de moyenne ou haute chute, externe avec parois métalliques [image de : SwitchBazaar.com – Blog (2021). *Hydro Electric Power Station or Hydro Electric Power Plant.* <https://switchbazaar.com/blog/hydro-electric-power-station-or-hydro-electric-power-plant/>].

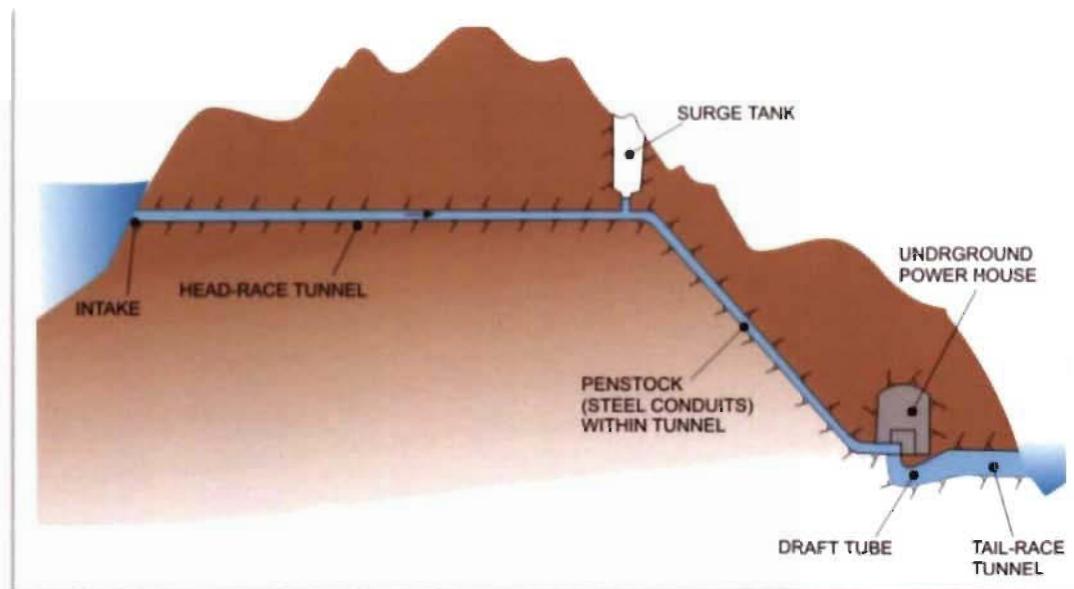


Figure 1.1.3 Conduite longue, de haute chute, creusée dans le roc avec parois métalliques, en roc ou bétonnée [image de : NPTEL. (2021). *Hydropower Engineering.* Version 2 CE IIT, Kharagpur, India. <https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/105105110/pdf/m5i02.pdf>].

1.2 Bâches spirales

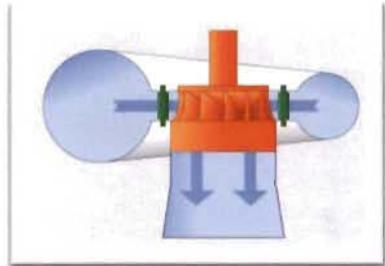


Figure 1.2.1 Bâche spirale de haute chute, section circulaire, avec parois métalliques [image de : U.S. Department of Energy's Water Power Technologies Office. (2021). *Types of Hydropower Turbines*. Washington DC, USA. <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines>].

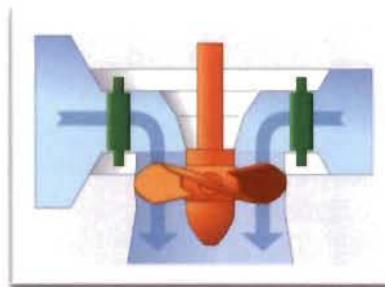


Figure 1.2.2 Bâche spirale de basse chute, section rectangulaire, en béton [image de : U.S. Department of Energy's Water Power Technologies Office. (2021). *Types of Hydropower Turbines*. Washington DC, USA. <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines>].

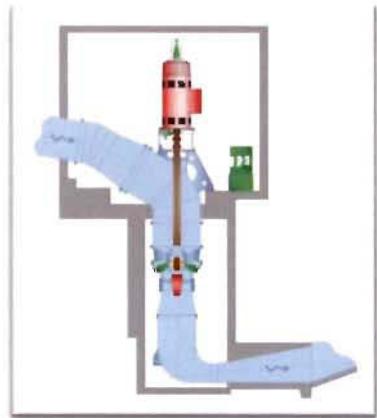


Figure 1.2.3 Bâche spirale comme zone de transition entre la partie amont et la partie aval pour les turbines saxo/en Z, basse ou moyenne chute, conduite métallique de section circulaire [image de : Mavel a.s. (2015). *Kaplan Z*. Benesov, Czech Republic. <https://mavel.cz/turbines/kaplan/>].

2. Types de GTA utilisés avec les différentes composantes

2.1 Types de turbines

Différents GTA nommés d'après le type de turbine employé ont été rencontrés lors de la campagne d'essais :

- Francis, illustré à la Figure 2.1.1;
- Kaplan (avec pales mobiles, utilisées aussi pour les groupes saxo), illustré à la Figure 2.1.2;
- Hélice (nommée aussi Kaplan avec pales fixes), illustrée à la Figure 2.1.2.



Figure 2.1.1 Turbine ou roue d'eau de type Francis [image de : Hydro-Québec (2021). *L'hydroélectricité - Turbines.* <http://www.hydroquebec.com/comprendre/hydroelectricite/types-turbines.html>].



Figure 2.1.2 Turbine ou roue d'eau de type Kaplan ou encore hélice [image de : Hydro-Québec (2021). *L'hydroélectricité - Turbines.* <http://www.hydroquebec.com/comprendre/hydroelectricite/types-turbines.html>].

2.2 Composants d'un GTA

Sur la vue de coupe d'un GTA présentée sur la Figure 2.2.1 on peut voir les composants : en haut se trouve partie alternateur et en bas la partie turbine. Les traductions françaises sont rajoutées en rouge sur l'image originale.

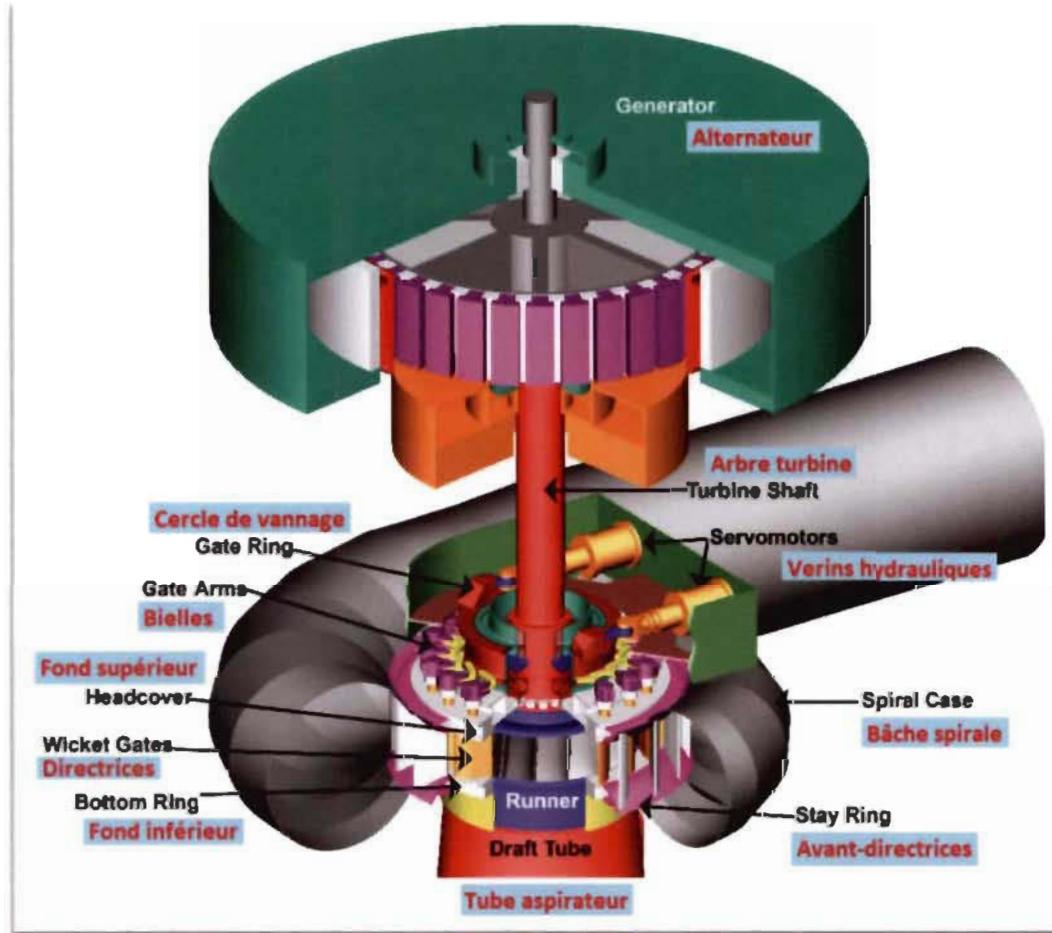


Figure 2.2.1 vue de coupe générale d'un GTA [image de : Lewis B. (2014). *Improving unsteady hydroturbine performance during off-design operation by injecting water from the trailing edge of the wicket gates*. Semantic Scholar. <https://www.semanticscholar.org/paper/Improving-unsteady-hydroturbine-performance-during-Lewis/89deac3222ee50ee475ce90f3f354a602b73ea2a>].

Sur la Figure 2.2.2 on peut voir plus en détail les composants de la partie turbine. Les traductions françaises sont rajoutées en rouge sur l'image originale.

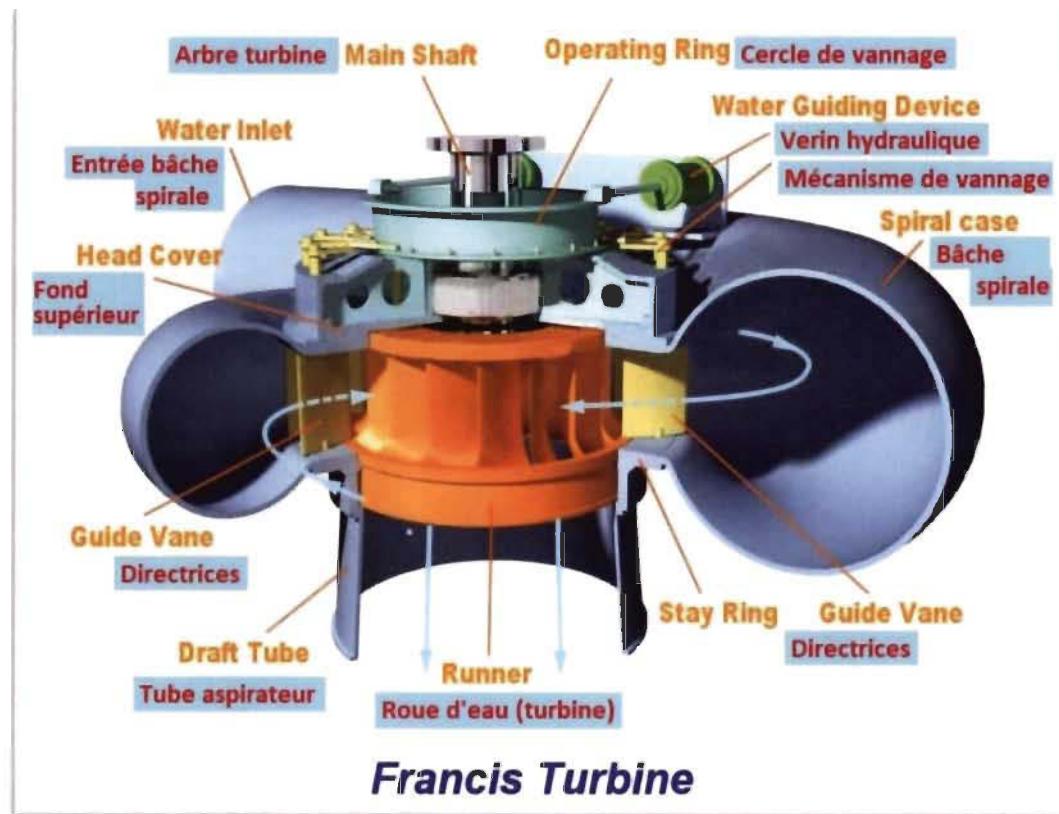


Figure 2.2.2 Détail des composants de la partie turbine d'un GTA [image de : The Constructor (2019). *Francis Turbine – its Components, Working and Application.* <https://theconstructor.org/practical-guide/francis-turbines-components-application/2900/>].

2.3 Mécanisme de réglage du débit d'eau qui traverse la turbine

Sur la Figure 2.2.3 on peut voir plus en détail les composants du mécanisme de vannage qui assure le réglage du débit d'eau qui traverse la turbine. Les traductions françaises sont rajoutées en rouge sur l'image originale.

Les vérins hydrauliques reçoivent le débit d'huile sur le côté fermeture ou bien ouverture. Par l'extension/rétraction des tiges, ils tournent le cercle de vannage qui produit par l'intermédiaire de l'embielage la fermeture, respectivement l'ouverture des directrices. Ainsi le débit d'eau est soit coupé, soit augmenté.

Les sollicitations au niveau du PHYDR dû au mouvement des directrices sont causées par :

- La fermeture brusque des directrices : coup de bâlier (LCF);
- L'oscillation des directrices lors du réglage du débit d'eau : sollicitations cycliques (HCF).

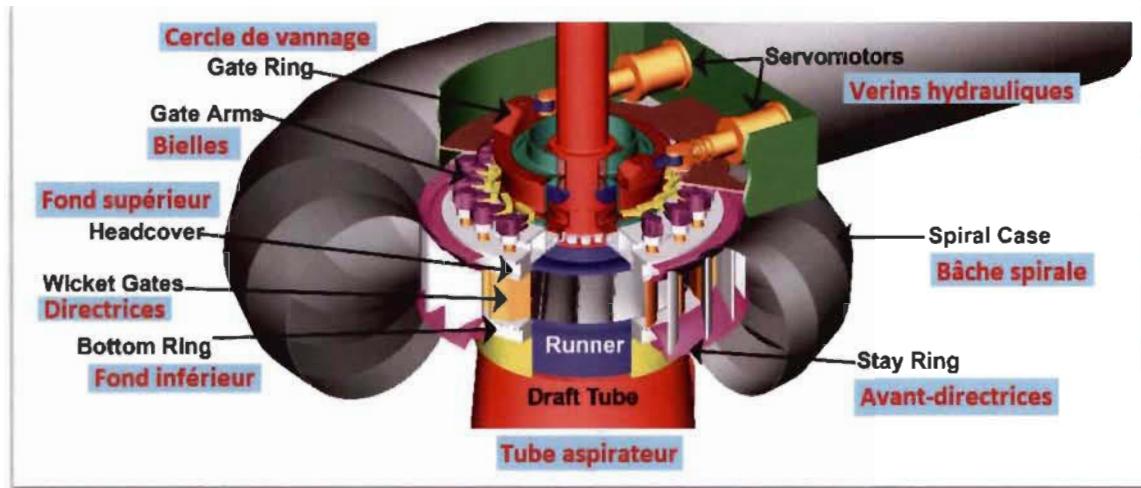


Figure 2.3.1 vue de coupe du mécanisme de vannage d'un GTA [image de : Lewis B. (2014). *Improving unsteady hydroturbine performance during off-design operation by injecting water from the trailing edge of the wicket gates*. Semantic Scholar. <https://www.semanticscholar.org/paper/Improving-unsteady-hydroturbine-performance-during-Lewis/89deac3222ee50ee475ce90f3f354a602b73ea2a>].

3. Systèmes de contrôle et protection du GTA

Le fonctionnement d'un GTA dans les paramètres requis est assuré par le système de commande de la centrale dans son entier ainsi que le système de contrôle de chaque GTA. Les paramètres d'exploitation sont dictés entre autres par les besoins en :

- Fréquence du réseau;
- Puissance du réseau;
- Gestion de l'hydraulique (débit d'eau de la rivière, niveau dans le barrage);
- Évènements et demandes du réseau;
- Demandes des interconnexions avec d'autres réseaux.

3.1 Le régulateur de vitesse

Le fonctionnement du GTA et l'exploitation dans le mode souhaité sont assurés par le régulateur de vitesse. La demande du centre de conduite du réseau est reçue par le contrôleur électronique du régulateur (régleur) et le signal est traduit ensuite par l'intermédiaire d'un étage électrohydraulique (valve proportionnelle) dans un signal hydraulique qui est amplifié par la suite (distributeur hydraulique principal) résultant une commande de puissance hydraulique transmise aux vérins hydrauliques. Finalement, tel que décrit déjà dans le paragraphe 2.3, les directrices vont moduler le débit d'eau et par conséquent la vitesse de rotation (fréquence) et la puissance à la sortie de la roue.

3.2 Le système de protection du GTA

Pour des situations exceptionnelles quand l'intégrité du GTA ou encore la sécurité est mise en danger, le système de protection du GTA assure l'arrêt du groupe et la sécurisation de l'équipement dans cet état. Les déclencheurs de protection et les types de fermetures sont établis à l'étape de conception en fonction du type de GTA et de l'exploitation prévue. Ce système agit de façon automatique et peut commander un arrêt lent s'il n'y a pas de danger imminent ou encore rapide si la fermeture lente provoquait des dégâts.

Pour l'arrêt rapide un circuit électrohydraulique de fermeture rapide (solénoïde d'arrêt d'urgence) est actionné, le signal hydraulique contourne le régulateur de vitesse et force directement le distributeur hydraulique principal en fermeture qui commande à son tour la fermeture des vérins hydrauliques. Par conséquent, les directrices se ferment sur la vitesse maximale permise par les ajustements des passages d'huile (tBAF).

Pour l'arrêt lent, le régulateur de vitesse est utilisé et la fermeture se fait avec baisse contrôlée de la puissance fournie en réseau, ensuite à partir de la vitesse de marche à vide le circuit de fermeture rapide en urgence (tBAF) est actionné afin de finir la fermeture et de sécuriser le groupe en position fermée.

3.3 Paramètres et ajustements de protection d'un GTA

Les paramètres monitorisés qui peuvent enclencher une séquence de fermeture par les protections sont nombreux, entre autres :

- Vitesse du groupe;
- Puissance de l'alternateur;
- Ampérages à divers endroits;
- Températures des divers composants;
- Débits des divers fluides;
- État de fonctionnement des divers systèmes auxiliaires.

Les arrêts d'un GTA en exploitation normale ou par protections peuvent être :

| | | |
|---------------------------------|---------|---|
| Arrêts : volontaires : | lentes | = baisse de charge par régulateur de vitesse |
| contrôlé (protections) : | lentes | = par régulateur de vitesse |
| | rapides | = par le circuit d'urgence |
| non contrôlés : | rapides | = par le circuit d'urgence, suivant l'ouverture du disjoncteur général (perte de ligne) |

Les paramètres de contrôle lors de ces séquences sont :

- **Arrêt rapide** : la vitesse de fermeture rapide des directrices par le circuit d'urgence tBAF. Il est nommé aussi temps mécanique, car son ajustement est un ajustement mécanique càd les butées mécaniques qui limitent la course maximale du distributeur hydraulique principal.
- **Arrêt lent** : la vitesse de fermeture lente des directrices par le régulateur électronique (baise de charge ou pente de fermeture). L'ajustement est un paramètre de programmation dans le contrôleur électronique qui respecte les requis en termes de pente admissible pour le réseau électrique.

4. Objectifs et paramètres de contrôle lors de la campagne d'essais

4.1 Paramètres de contrôle

Les paramètres enregistrés lors des essais ont été :

- Surpression dans la partie amont (conduite d'amenée, entrée de bâche, porte de bâche, section des prises Winter-Kennedy) [dP%];
- Pression statique (utilisée comme référence), mesurée et transposée à l'axe de la turbine lorsque les directrices étaient fermées;
- Surpression dans la partie aval (porte de l'aspirateur);
- Dépression / vacuum dans la partie aval (porte de l'aspirateur);
- Niveaux amont /aval;
- Position du vannage [%WG], donnant la vitesse de fermeture des directrices en eau vive;
- Position des pales [%RB], donnant la vitesse d'ouverture des pales en eau vive (pour les Kaplans);
- La vitesse de fermeture des directrices en eau morte (utilisée comme référence), donnée par le déplacement du vannage en eau morte [tBAF];
- La vitesse d'ouverture des pales en eau morte (utilisée comme référence), donnée par le déplacement des pales en eau morte;
- Vitesse de rotation du groupe;
- Puissance de l'alternateur;
- Position du tiroir du distributeur hydraulique principal;
- Pressions d'huile aux ports des servomoteurs;
- Température de l'huile dans le bac de régulation;
- Pression d'huile dans le réservoir oléopneumatique;
- Position du disjoncteur principal;
- Intumescence amont/aval.

Le principal paramètre contrôlé au cours de ces expériences a été la vitesse de fermeture rapide des directrices [tBAF]. De façon générale, les paramètres de contrôle sur lesquels nous avons eu une possibilité d'ajustement lors des essais ont été :

- La position du vannage au moment du rejet de charge;
- La puissance fournie en réseau au moment du rejet de charge;
- La vitesse de fermeture rapide des directrices par le circuit d'urgence [tBAF];
- La vitesse de fermeture lente des directrices par le circuit de la deuxième pente;
- La position d'enclenchement de la fermeture par la pente lente des directrices;
- L'admission de l'air à l'aval de la roue (par aspiration).

4.2 Objectifs et principe des essais

Le principal objectif des essais a été de reproduire et mesurer les pressions maximales que le groupe pourrait voir lors de l'exploitation, que ce soit en opération normale ou lors de l'activation des séquences de protection.

Afin de provoquer des coups de bâlier contrôlés, la procédure de base a suivi l'activation de la fermeture rapide par protections. Dans ce sens, une fois le groupe rendu à 'ouverture / puissance voulue, nous avons simulé une perte de ligne/réseau par l'ouverture du disjoncteur principal de l'alternateur. La séquence de protection par arrêt rapide s'enclencheait automatiquement et les directrices étaient envoyées en fermeture rapide par le circuit d'urgence tBAF.

Les paramètres suivis en temps réel pendant chaque essai ont été :

- La surpression maximale dans la partie amont [dP%];
 - Surpression maximale dans la partie aval;
 - Dépression / vacuum minimal dans la partie aval;
 - Survitesse de rotation maximale du groupe;
 - Intumescence maximale dans la galerie des vannes de prise d'eau.
-

Appendice C
Article publié à WCEAM 2021
- World Congress on Engineering Asset Management -

Paper 048

Water Hammer Interaction Between Hydraulic Power Generators and Hydraulic Passages

Sorin-Ioan Lupa, Martin Gagnon and Georges Abdul-Nour

Abstract The water hammer effect influences the life cycle of Hydraulic Passages and may even cause a sudden structural failure. This research studies the factors that influence overpressure in the Hydraulic Passages during load rejection and some particular cases during operation. The data indicates that the rapid closure rate of the guide vanes has an impact on the phenomenon. A general trend matching a 3rd order polynomial was identified. The parameters of the equation differ from case to case depending on the type of Hydraulic Power Generator, the closing rate and the type of Hydraulic Passage. The results show that the overpressure value also depends on other factors, some of which are not typically taken into consideration.

1 Introduction

Lately, demand on the electrical network has changed significantly and consequently Hydraulic Power Generators (HPG) are increasingly required for flexible operation to regulate and balance the grid, according to March [7]. Dreyer et al. [3] note that it is essential to know and estimate Hydraulic Passage (HYP) additional loadings caused by HPG operation in transient zones. The interaction between the HPG and the HYP will be considered in order to formalize the link between HPG operating mode and the impact on the HYP aging process. More extreme HPG service will result in supplementary water hammers and pressure fluctuations, which will cause a premature degradation of the HYP structure.

The purpose of this study is to identify factors that contribute to the water hammer phenomenon and establish their influence. By analyzing extreme loads in HYP, we wish to guide the advancement of adapted models and numerical simulations for transients. On the one hand, Selz [12] notes that the overpressure is a security issue regarding compliance with the maximum allowable working pressure, updated to the real status of hydraulic passage. On the other hand, Gagnon et al. [4] show that cyclical loadings in transient mode have a major impact on equipment reliability. The water hammer theory is well documented in the literature. At the beginning of the century, Bouchayer [1] and Le Comte de Sparr [2] identified some simplistic theories used to design hydraulic passages. The theory was

2

developed by Parmakian [9] from the simplistic assumptions to current classic numerical models and simulations. Nowadays, in contrast to the classic constant pressure drop hypothesis, water hammer dynamic models are based on the concept of similarity of HPG to a variable pressure loss. According to Ramos and Almeida [10;11], the runner in overspeed is acting like a dynamic orifice.

This study will analyse the results obtained from various experiments on a wide range of HPG and HYP configurations. A discussion will follow and conclusions will be drawn, then certain recommendations will be made in order to orient and support decisions for an efficient asset management of the HPG/HYP. On the one hand, certain measures shall be applied in order to increase the longevity of the asset and on the other hand, critical actions are required to guarantee the safety of the installations in the long term.

2. Methodology

Experimental measurements of HPG behaviour during load rejections were studied. The main parameter controlled during these experiments is the closing rate of guide vanes. At different wicket gates opening angles (% WG), load rejections were generated to activate the emergency shutdown protection sequence of the HPG and to command a rapid closure of the wicket gates.

The study was conducted on 24 HPG configurations (between A to Z in the text), for different types of turbine (Francis, Kaplan, propeller, sesto), various power (from 4 to near 400 MW) and different types of hydraulic passages (long/short, underground/external, low/high head, concrete/welded, etc.) within the Hydro-Québec HPG fleet. For each configuration, several experimental data points at different closing rates (tBAF) were recorded. The experiments were organized with 4 objectives:

- (i) Evaluating the trends for the limit values of parameters as a function of the wicket gates opening at the time of load rejection, in order to identify the areas where values are at maximum. The overall evolution of parameters for different types of HPG will guide future unit commissioning or readjustment tests for hydraulic turbines.
- (ii) Analyzing the influence of various factors acting directly on the overpressure of the spiral case and identifying their contribution. For different types of HPG and for different %WG at the time of load rejection, the analysis will quantify the impact of the variation of each parameter, especially for the tBAF. Knowing the share of each parameter will facilitate decision-making regarding the relevance of adjustments during commissioning tests.
- (iii) Temporal analysis of the factors influencing the water hammer effect to observe the cause-effect relationship and to identify their contribution to overpressure. This will make it possible to identify the interactions, to define precedence and to identify the critical factors.
- (iv) Analyzing the unusual behaviours that occurred during the tests and identifying the origins of these exceptional events.

3. Results

The recorded parameters were: the wicket gates position (% WG), the pressure in spiral case and penstock, the speed of the unit, the pressure in the draft tube, the upstream and downstream levels, and the position of the runner blades.

Furthermore, the influences of a second wicket gates closing rate, the position of the runner blades and the cam curve were also observed on some HPG. Other parameters like the intumescence of the upstream and downstream levels were not systematically recorded on all HPGs.

The goals of this experimental campaign were:

- to validate / readjust the tBAF in order to keep overpressure inside the hydraulic passage (HYP) below the maximum allowable pressure (updated).
- to limit overpressure and vacuum fluctuation inside the draft tube.
- to limit runner blades stress during unit start and stop sequence, as well as during load fluctuations, according to the recommendation of Gagnon et al. [4].
- to reduce intumescence at the water intake during load rejections.

All these experiments were carried out within acceptable overspeed for each unit. For each configuration, several closing times were tested in order to control the behaviour of the group and optimize the operating parameters. For each configuration, in order to compare data and identify trends, the obtained values were normalized based on the actual water head during each test and the maximum water head. Overall, to analyze the results from one configuration to another, the values for maximum water head were normalized a second time to a reference value (e.g., the static pressure when WG at 0%). A more detailed analysis of representative cases was conducted to correlate the different variations and interactions between the data, mainly as a function of the closure rate.

3.1 Overpressure evolution and trends

The results of the load rejection tests were classified according to the type of HPG. The value %dP on the graphs represents the test overpressures (dP) for a power plant normalized for the maximum head, then referenced to the design pressure. To facilitate comparison, the wicket gates position (%WG) has been used on the abscissa instead of the unit power output.

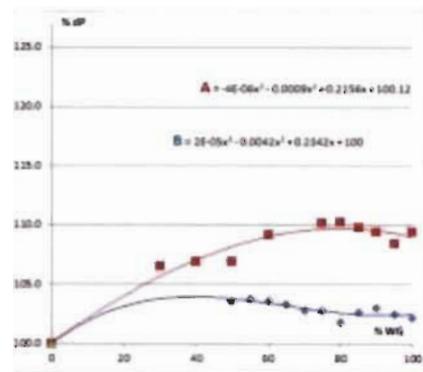
A specific trend was observed: similar behaviour of the maximum overpressure values as a function of the %WG at the time of load rejection. A 3rd order polynomial accurately represents the evolution of maximum pressures as shown in Figures 1 to 7. In general, the overpressures show a pronounced rise towards the upper values of the %WG.

The trends were also observed for the other parameters under study: variation of pressure/depression in the draft tube, unit overspeed, the closing rate of the wicket gates closure in flowing water, intumescence at the water intake, etc.

4

The trends for low-head propellers, less than 20 meters of water column (mwc), are shown in Fig. 1.

Fig. 1. %dP function of %WG for low-head propellers, power plants A and B (2016-2018).



The trends for low-head Francis (less than 40 mwc) are shown in Fig. 2 and 3.

Fig. 2. %dP function of %WG for low-head Francis, power plants C to E (2012-2018).

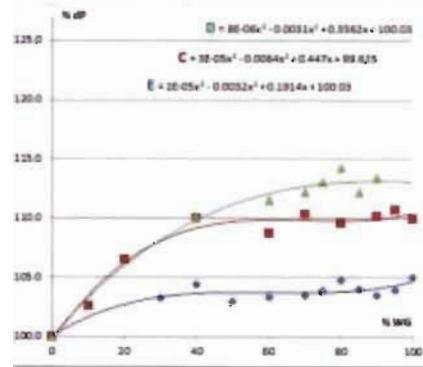
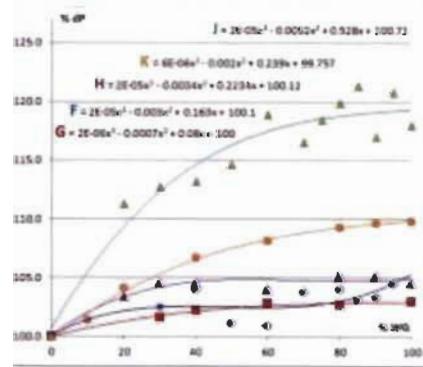


Fig. 3. %dP function of %WG for low-head Francis power plants F to K (2014-2015).



5

The trends for low-head Kaplan (less than 40 mwc) are shown below in Fig. 4, and for low-head saxos (less than 25 mwc) are shown below in Fig. 5.

Fig. 4. %dP function of %WG for low-head Kaplan, power plants N to P (2016-2017).

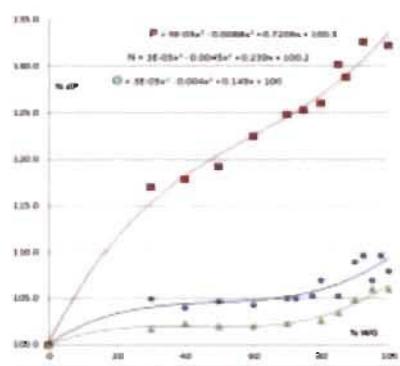
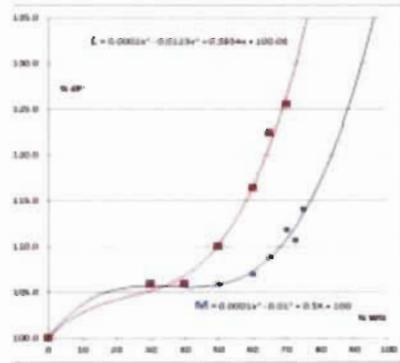
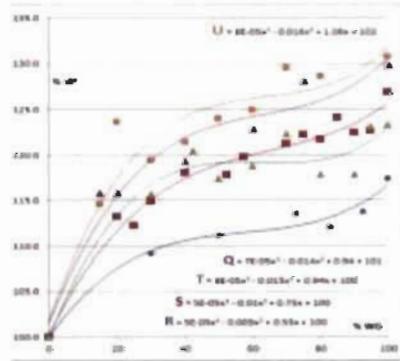


Fig. 5. %dP function of %WG for low-head saxo, power plants L and M (2017-2019).



The trends for medium-head Francis (40 to 50 mwc) are shown below in Fig. 6.

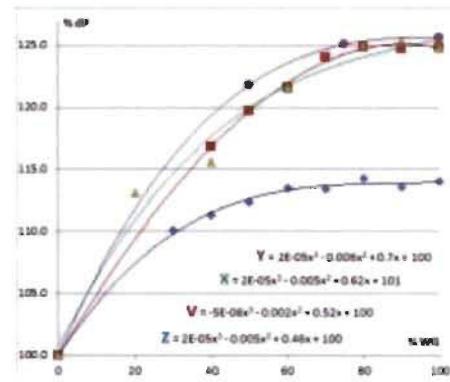
Fig. 6. %dP function of %WG for medium-head Francis power plants Q to T (2012-2018).



6

The trends for high-head Francis (80 to 140 mwc) are shown in Fig. 7.

Fig. 7. %dP function of %WG for high-head Francis, power plants V to Z (2013-2019).



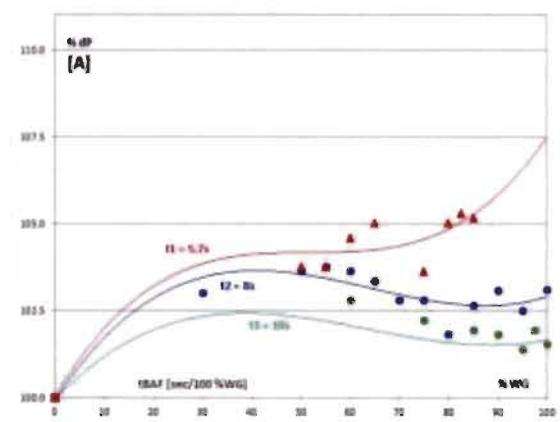
3.2 Analysis of the influence of various factors on overpressure

An analysis based on the different shutdown time rates of the wicket gates was carried out in order to separate the contribution of each factor to the spiral case overpressure. The wicket gates opening (%WG) stays on the x-axis. In all cases, the specific pattern of general behaviour identified previously was maintained.

3.2.1 Influence of rapid closure on overpressure

There is an observable correlation between overpressure values and the variation in the rate of wicket gates rapid closure tBAF. The evolution of the %P for different tBAF for a propeller operated in power plant A is shown in Fig. 8.

Fig. 8. %dP for different tBAF for a propeller in power plant A (2018).



The evolution of the %dP for different tBAF for a Francis operated in power plant E is shown in Fig. 9 and for a Kaplan in power plant P is shown in Fig. 10.

Fig. 9. %dP for different tBAF for a Francis in power plant E (2018).

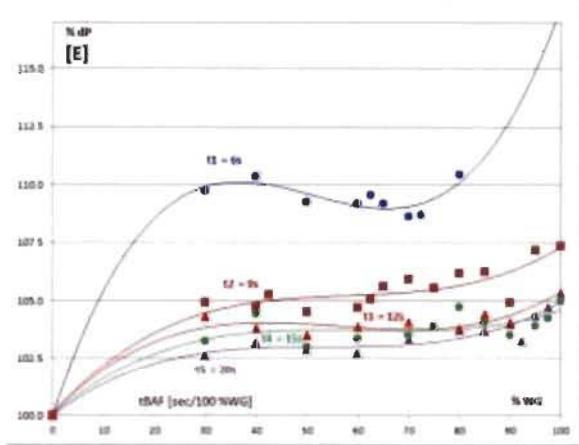
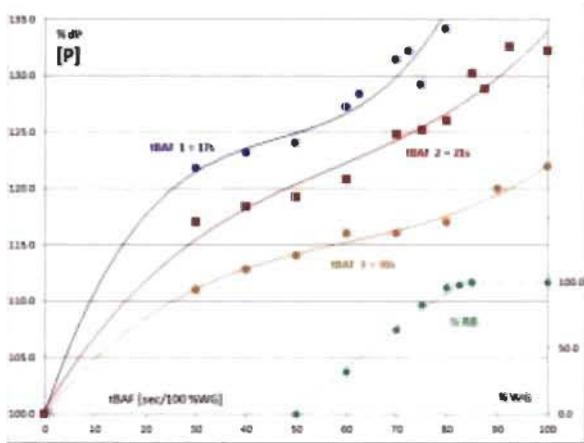


Fig. 10. %dP for different tBAF for a Kaplan in power plant P (2017).



3.2.2 Influence of rapid closure on the behaviour of other factors

It was found that when the rate of wicket gates closure is increased, some values worsen, some improve:

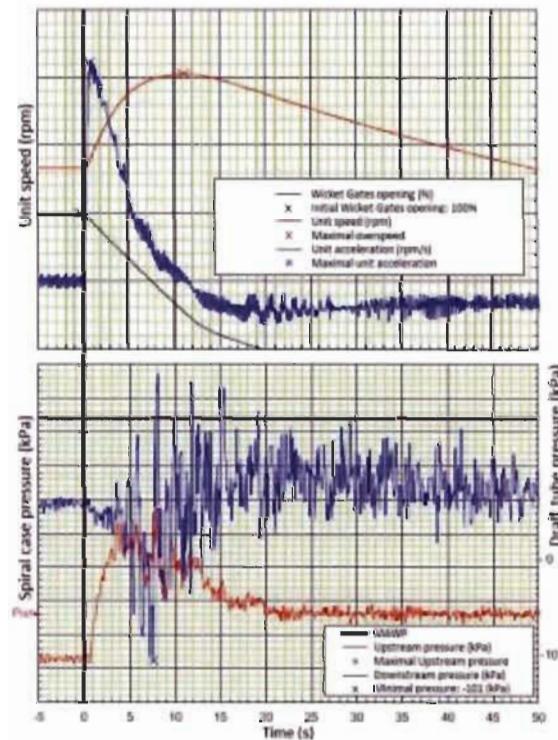
- the unit overspeed goes down;
- the overpressures and vacuum in the draft tube increase;
- the oscillation and the fluctuation along the hydraulic passage increase in amplitude and emerge more often.

It should be noted that overpressure is significantly influenced by the existence of a second closing slope for wicket gates, adjusted at a slower rate.

3.3 Temporal analysis of factor interaction

Depending on the type of HPG, there is an interaction in time among the measured values: overpressure, wicket gates opening, wicket gates closing rate, overspeed and variation of pressures/vacuum in the draft tube, unit speed, acceleration of the unit. In the example in Figure 11, for a load rejection of a Francis in power plant Y, the evolution in time of these parameters is presented.

Fig. 11. Parameters for a Francis load rejection in power plant Y (2019).



It can be observed that the maximum pressure peaks in the spiral case do not occur at the beginning when the guide vanes start to close from 100%, but later at 70% for the first time and at 50% for the second time. The pressure variation in the draft tube happens at the same time as the runner overspeed. The maximum vacuum in the draft tube occurs just before the second overpressure peak in the spiral case. Also, it is presumed that the first overpressure peak is due mostly to the sharp reduction in water flow by the wicket gates. On the other hand, the second one comes from the instability phenomenon induced by runner overspeed in the water flow, concomitant with the fluctuating pressure inside the draft tube. This conduct is related to the hypothesis made by Ramos and Almeida [10;11] that the runner in overspeed is acting as a dynamic orifice.

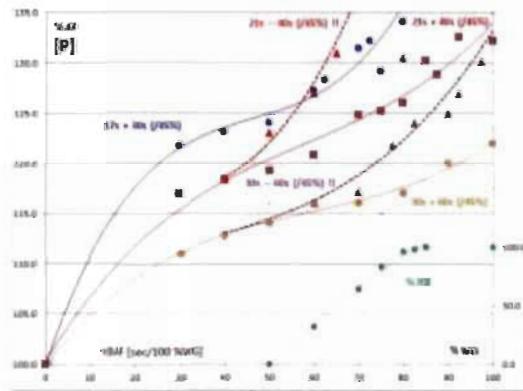
3.4 Exception analysis

Special cases encountered were analyzed separately to identify the origin of the unusual behaviour in emergency shutdown.

3.4.1 Deactivation of the second slope

In the case of a Kaplan turbine operated in power plant P, accidental failure of the valve ensuring the second closing slope caused a significant rise in the spiral case overpressure and the Fig. 12 shows overpressure values for three different tBAF.

Fig. 12. Influence of the second slope closing on the % ΔP for a Kaplan in power plant P (2017). The continuous lines represent the pressures obtained with a second slope closing below 45%WG, while the dotted lines show the pressure rise when the slow valve is off service.

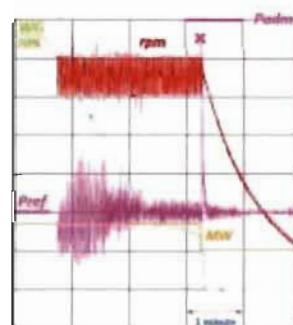


It is observed that the second slope has a significant effect on rising pressure. Moreover, the faster the first rate tBAF, the greater the influence of the second slope on higher overpressures. These results allow us to list the second slope closure of the wicket gates among the key influencing factors for overpressure.

3.4.2 Overpressure in closing from speed-no-load

For the power plant Y equipped with Francis turbines, Fig. 13 shows a significant overpressure in the spiral case at the end of an automatic shutdown sequence.

Fig. 13. Overpressure peak from speed-no-load in power plant Y (2016). At the very beginning of the last closing step, while the motion of the wicket gates was initiated from the speed-no-load position (rpm for approximately 14% WG) to 0% WG at normal rapid slope (tBAF = 15 s), an overpressure peak (x) close to the maximum allowable pressure (Padm) occurs in the spiral case. The graph also presents the unit power (MW) and the reference pressure when WG are closed (Pref).



10

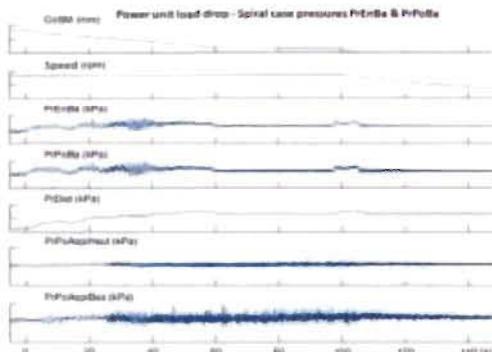
The analysis of this event suggests that the flow is not the only important factor causing the increase in overpressure inside the hydraulic passage.

3.4.3 Overpressure in speed regulation

An example of a load drop for a Francis turbine at power plant Y is shown in Fig. 14. During the wicket gates movement for speed regulation in normal operation or even while unit load variation, oscillations and instability phenomena occurs.

Fig. 14. Pressures in time during a power load drop for a Francis in power plant Y (2019).

The variation of regulation parameters causes oscillations and instability phenomena, which induce significant overpressures in the hydraulic passage.



4. Discussion

The analyse was conducted to get a better understanding of the HPG parameters that affect water hammer and transient regimes, which results in producing supplementary stress for the HPG. Ultimately, the scope of the study was to produce recommendations to facilitate decision making for sustained operations of the assets. In regard with this goal, the objectives of the experiments were met:

- it has been shown that for all the group configurations there is an optimal tBAF to ensure balance between overpressure and the other factors, including unit overspeed;
- there are always additional solutions to improve behaviour, such as the second closing slope, air injection inside the flow, etc;
- in some cases, either definitively or temporarily, the maximum wicket gates opening can be restricted to a permitted value in order to comply with the maximum allowable pressure.

A preview of the influence of the different factors on overpressure has been provided. To meet the objective of cause-effect relationships as well as the precedence status, more attention needs to be paid to the existing recorded data. A further analysis remains to be done in order to clearly separate the contribution of each factor.

11

The impact of extreme loads on the equipment should be addressed. Depending on the type of solicitation, the consequences and the occurring risks, the appropriate measures shall be applied.

Mainly, the considerations for asset management should focus on adopting solutions in order to increase equipment lifespan:

- apply less demanding operating modes for HPG;
- improve the existing maintenance;
- decrease the planned or unexpected shutdown periods.

Also, some preventive measures are needed in order to ensure a safe operation of the installations and to decrease the risk of accidents:

- secure critical adjustments protecting the equipment from extreme loads;
- reconsider the design criteria for projects;
- elaborate strategies for upgrades of the existing equipment.

5. Conclusion

It is important to have an in-depth understanding of the water hammer phenomenon, which makes it possible to identify the needs of the assets in order to recommend optimal operating parameters and protocols for the lifespan. From the asset management perspective, according to the previous inventory of considerations, several specific recommendations will have favourable effects on benefits:

- for upgrades or new projects consider the operation mode accordingly to the business-case of the unit and grid requirements;
- for certain operating sequences or protections, instead of activating the emergency shutdown circuit, close the WG at a lower speed by the electronic speed governor, then finish the sequence using the shutdown solenoid valve to lock the unit;
- use a proactive maintenance strategy;
- adapt the maintenance to the real level of stresses/solicitations;
- perform monitoring and periodical inspections in order to intercept degradations.

While the application of previous measures can generate immediate and long-term benefits, the lack of action on following ones can have a dramatic effect on the safe operation of the equipment:

- validate the tBAF value to prevent unexpected overpressure;
- ensure the hydraulic circuit of the governor to prevent accidental switch of the tBAF;
- install a second closing slope;
- confirm the real allowable working pressure for the HYP accordingly with the actual degradation of the equipment;
- at commissioning, adjust the critical parameters properly (tBAF, overspeed).

12

A proper asset management is essential to maximize the value of operating activities, reduce unplanned costs or delays, and ensure safe operations. The observed behaviours in overpressure will improve the advanced calculation models proposed by Nicolet et al. [8] and will help find the main factors to account for during the design of hydraulic passages, as well as the parameters to adjust during commissioning. Also, a more accurate hydraulic model will permit to justify the proposed measures in terms of asset management, to ensure safe service from commissioning to the end of the equipment life cycle.

References

- [1] Bouchayer A. (1902). Établissement des conduites forces. *La Houille Blanche* n° 8 décembre France.
- [2] Dollon Q. (2019). Identification des caractéristiques du comportement dynamique des roues GTA par l'étude des régimes transitoires. *Devis de Recherche - DGA1033*, ETS, Montréal.
- [3] Dreyer M., Nicolet C., Gaspoz A., Biner D., Rey-Mermet S., Saillen C., Boulicaut B. (2019). Digital clone for penstock fatigue monitoring. *IAHR*, 9 octobre, University of Stuttgart.
- [4] Gagnon M., Nicolle J., Morissette J., Lawrence M. (2016). A look at Francis runner blades response during transients. *IAHR*, 4-8 July Grenoble France.
- [5] Ghidaoui M.S., Zhao M., McInnis D.A., Axworthy D.H. (2005). A review of water hammer theory and practice. *Applied Mechanics Reviews ASME* V5.
- [6] Le Comte de Sparr (1919). L'étude des coups de bâlier. *La Houille Blanche* n°3 fevrier France.
- [7] March Patrick (2017). *Flexible Operation of Hydropower Plants*. EPRI Journal, 3002011185, Palo Alto, CA, USA.
- [8] Nicolet C., Dreyer M., Béguin A., Bollaert E., Torrent S., Dayer J.-D. (2018). Hydraulic Transient Survey at Cleuson-Dixence with Real-Time Hydro-Clone Monitoring System. *International Journal of Hydropower & Dams* octobre Gdansk Poland.
- [9] Parmakian J. (1963). *Waterhammer analysis*. Dover Publications, New York.
- [10] Ramos H.M., Almeida A.B. (2001). Dynamic orifice model on waterhammer analysis of high or medium heads of small hydropower schemes. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 39, no 4, octobre, pag 429-436.
- [11] Ramos H.M. (2010). Special Concerns Related to the Runaway Effect in Francis Turbines. *Hydro Review* Issue 5 novembre Volume 18.
- [12] Selz A. (1986). Recertification of pressure vessels. *Journal of Pressure Vessel Technology*, ASME Pressure Vessels and Piping Division Vol 108.