

Surveillance des puits et galeries blindés par analyse des coups de bélier en continu

Fadi Hachem, Anton Schleiss

Résumé

Avec demande croissante de l'énergie de pointe, les centrales hydro-électriques à accumulation opèrent de plus en plus d'une manière abrupte pour assurer avec efficacité, flexibilité et sécurité l'équilibre entre la production et la demande d'électricité. Les coups de bélier produisent des sollicitations fortement dynamiques dans les puits et galeries blindés. Par la fatigue des matériaux les marges de sécurité peuvent devenir critiques surtout avec l'utilisation des aciers de blindage à haute résistance dans les nouvelles centrales hydro-électriques. Dans le cadre d'un projet de recherche, une approche de dimensionnement adaptée et une méthode novatrice de surveillance ont été développées avec une attention particulière sur le phénomène d'interaction fluide-structure. Le modèle théorique proposé peut être considéré comme base pour le développement des nouveaux critères de dimensionnement qui considèrent la mécanique de rupture fragile dans l'analyse de la réponse du blindage. D'autre part, l'influence de la détérioration locale de la rigidité de la paroi des puits et galeries blindés sur la célérité et l'atténuation de l'onde de coup de bélier a été étudiée expérimentalement. Une méthode de surveillance pour détecter la formation, l'endroit et la sévérité de ces faiblesses a pu être développée par une analyse en continu du signal du coup de bélier. Une série de mesures sur le puits blindé d'un aménagement de pompage-turbinage en Suisse a été également effectuée pour valider le concept de surveillance proposé en pratique.

Zusammenfassung

Mit zunehmender Nachfrage nach Spitzenenergie werden die Speicherkraftwerke immer rauer betrieben, um das Gleichgewicht zwischen Produktion und Nachfrage effizient, flexibel und sicher zu gewährleisten. Stark wechselnde Betriebszustände verursachen dynamische Belastungen in gepanzerten Druckstollen und Druckschächten. Durch Materialermüdungen können sich mit der Zeit die Sicherheitsmargen verringern, insbesondere im Falle von hochfesten Stählen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde ein entsprechend angepasster Bemessungsansatz sowie ein neues Überwachungskonzept für Stahlpanzerungen entwickelt, welches die Wechselwirkungen zwischen Druckschwankungen und Panzerung berücksichtigt. Das vorgeschlagene theoretische Modell dient als Entwicklungsbasis für neue Bemessungskriterien, welche die Bruchmechanik von hochfesten Stählen berücksichtigen. Der Einfluss einer sich in der Panzerung ausbildenden Schwachstelle auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Dämpfung des Druckstosses wurde experimentell untersucht. Es konnte eine Überwachungsmethode entwickelt werden, welche es erlaubt, mit Hilfe einer kontinuierlichen Analyse des Druckstossesignales die Entstehung, den Ort sowie das Ausmass einer Schwachstelle in einem gepanzerten Druckschacht oder Druckstollen frühzeitig festzustellen. Die praktische Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Überwachungskonzeptes wurde an einem Pumpspeicherkraftwerk in der Schweiz mit einer Messkampagne überprüft.

1. Introduction

Les conditions du marché de l'électricité de pointe et de réglage offrent une excellente opportunité aux centrales hydroélectriques à accumulation de pompage-turbinage de valoriser leur production tout en gardant des marges de sécurité acceptables. En plus de son prix attractif, cette énergie de réglage est indispensable pour éviter le black-out qui pourrait couvrir des grandes régions et causer des pertes économiques importantes.

Un consortium scientifique nommé HydroNet I (<http://hydronet.epfl.ch>) a été créé en 2007 dans le but de définir des nouvelles méthodologies de dimensionnement, de fabrication, d'opération, d'auscultation et de contrôle des centrales de pompage-turbinage. L'objectif stratégique de ce consortium est de maintenir la position privilégiée de

la Suisse dans le domaine de la production hydro-électrique et dans l'exportation de la haute technologie.

Le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a été désigné responsable de la partie génie civil de HydroNet I. Deux thèses ont été définies avec comme sujets: (i) comprendre l'influence de pompage-turbinage sur la sédimentation des réservoirs et (ii) le dimensionnement et l'auscultation des puits et galeries blindés. C'est ce dernier qui fait l'objet de cet article où les objectifs suivants sont visés:

1. Amélioration des bases de dimensionnement par une étude théorique qui pourra être le point de départ pour des futurs développements incluant les méthodes de la mécanique de rupture fragile pour analyser la réponse

et la sécurité des blindages fabriqués en acier à haute résistance.

2. Développement de nouvelles méthodes et approches d'auscultation non-intrusives basées sur l'analyse des signaux transitoires générés par les coups de bélier et sur le phénomène d'interaction fluide-structure. Ces méthodes sont capables de détecter la formation, l'emplacement et la sévérité d'une importante détérioration de la rigidité de la paroi des puits et tunnels blindés par le moyen de traitement et d'analyse des pressions dynamiques mesurées à leurs deux extrémités accessibles.

2. Problématique du dimensionnement

L'analyse de l'état des connaissances (Hachem & Schleiss, 2009) a montré que



les méthodes de dimensionnement quasi-statiques utilisées actuellement sont basées sur l'idée de limiter la contrainte de traction dans le blindage au-dessous de la limite d'élasticité de l'acier utilisé. D'autres critères liés aux détails de construction, comme les soudures, et à des limites de tolérance sont également respectés pour diminuer le risque de formation des contraintes locales excessives dans le blindage. Ces méthodes de dimensionnement ainsi que l'analyse de la sécurité des puits et galeries blindés sont lacunaires pour le dimensionnement des blindages fabriqués avec des aciers à haute résistance dans les nouvelles centrales hydro-électriques. Les problèmes engendrés par l'utilisation de ce type d'acier, notamment la rupture fragile et la fatigue, nécessitent une amélioration et adaptation des modèles théoriques actuels de calcul pour des telles situations.

2.1 Vitesse de propagation des coups de bélier

Dans une première étape, des approches générales pour estimer la vitesse de propagation des coups de bélier à l'intérieur des puits et galeries blindés ont été analysées dans le cas quasi-statique, c'est-à-dire, sans considérer l'interaction fluide-structure (FSI) et la dépendance de la vitesse de la fréquence (Hachem & Schleiss, 2011a). Les conditions aux bords ainsi que les hypothèses prises en considération dans la formulation de ces approches ont été présentées et discutées en détail dans Hachem & Schleiss (2011a). Les expressions reformulées de la célérité ont été également comparées à d'autres formules qui sont actuellement utilisées. Dans le cas des blindages en acier de faible épaisseur entourés de rocher à faible module d'élasticité, les relations proposées par Jaeger (1977) et Parmakian

(1963) surestiment la vitesse des ondes de l'ordre de 3 à 4.5% alors que dans la formule de Halliwell (1963), la surestimation atteint 7.5%. La vitesse quasi-statique des ondes est significativement influencée par la condition du béton de remplissage et du rocher entourant le blindage (fissuré ou pas). Dans le cas où ces deux matériaux sont considérés comme fissurés, la vitesse quasi-statique est surestimée entre 1% et 8% relativement au cas du béton et rocher non fissurés. En fonction du degré de rigidité de blindage, le FSI engendre des différences significatives dans l'estimation de la vitesse des coups de bélier.

2.2 Modèle mathématique de dimensionnement

Dans une deuxième étape, un modèle basé sur le phénomène d'interaction fluide-structure (FSI) a été proposé (Hachem & Schleiss, 2011a) pour le développement des nouveaux critères de dimensionnement qui considèrent la mécanique de rupture fragile pour analyser la réponse du blindage en acier à haute résistance. Dans ce modèle (figure 1), le béton de remplissage et la roche fissurée entourant le blindage sont modélisés dans les deux directions longitudinales et transversales par un système constitué d'un ressort de rigidité, K_{sr} , d'un amortisseur, C_r , et d'une masse additionnelle, M_r . L'équation de dispersion quadratique résultante de ce modèle FSI a montré la dépendance entre la rigidité de la paroi des puits (caractérisée par les coefficients K_{sr} , C_r et M_r) et deux paramètres importants, à savoir, la vitesse de propagation et l'atténuation de l'amplitude des ondes de pression. Ces deux paramètres peuvent donc être considérés comme indicateurs globaux pour détecter le changement de rigidité des parois de ces structures. La résolution de l'équation de dispersion dans le domaine fréquentiel par le biais d'un exemple numérique, a montré que dans l'intervalle des hautes fréquences (supérieure à 600 Hz), l'approche FSI génère des vitesses d'onde 13% au-dessus de celles obtenues dans le cas quasi-statique (figure 2). Cette différence de vitesse peut atteindre 150% pour les fréquences entre 150 Hz et 300 Hz. Le mode de propagation lié à l'onde précurseur présente une basse fréquence de coupure qui dépend de la distribution longitudinale de la rigidité du blindage. Le premier mode d'onde acoustique commence à se propager à partir d'une fréquence proche de 525 Hz. La fréquence de coupure relative à ce mode est fonction

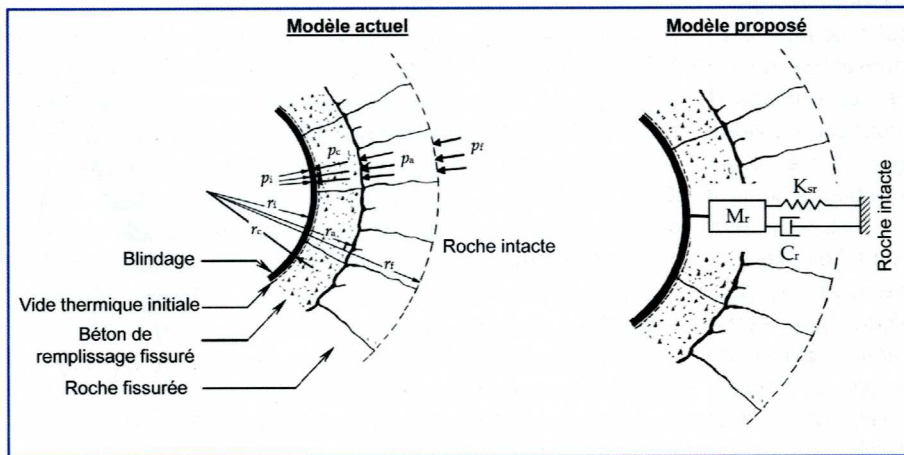


Figure 1. Modèle théorique actuel et celui proposé pour le dimensionnement des puits et galeries blindés en tenant compte de l'interaction fluide-structure.

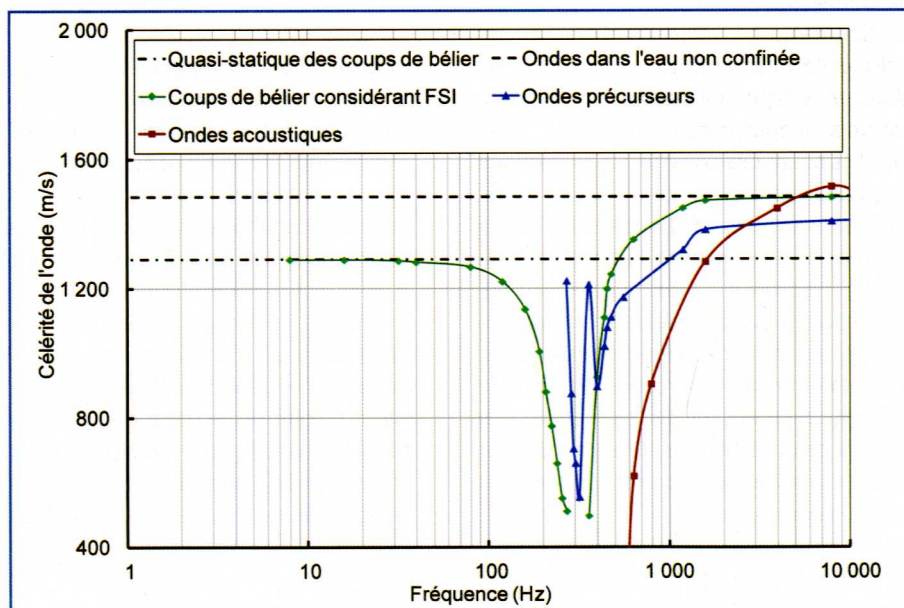


Figure 2. Célérités des ondes des coups de bélier dans les puits et galeries blindés dans le cas quasi-statique et en considérant le FSI. Les ondes précurseur et acoustiques sont également présentées.

de la rigidité radiale du blindage. Dans la pratique, la différence de vitesse des coups de bélier entre le cas FSI et le cas quasi-statique est considérée comme tolérable en raison de l'incertitude dans l'estimation des propriétés mécaniques du rocher et de la présence de l'air dans l'eau. Les pressions dynamiques obtenues par l'approche théorique classique des coups de bélier sont peu influencées par cette différence de vitesse de l'onde alors que le FSI peut engendrer des pressions dynamiques extrêmes à hautes fréquences.

Le raffinement et la validation du modèle théorique proposé sera faite dans une prochaine thèse qui se déroulera dans le cadre du projet HydroNet II. Cette validation par modélisation numérique et mesures sur modèle physique et sur prototype permettra le développement des nouvelles méthodes et procédures de dimensionnement pour les puits blindés. Les résultats de ces analyses fourniront des précieuses bases de dimensionnement pour éviter la rupture des puits blindés suite à la formation et la propagation des micro-fissures dans les soudures de l'acier du blindage à haute résistance comme observé lors de la rupture du puits blindé de l'aménagement Cleuson-Dixence.

3. Surveillance non-intrusive des puits et galeries blindés

3.1 Description du phénomène physique

En parallèle au développement d'une procédure moderne de dimensionnement pour les nouvelles constructions, l'auscultation des ouvrages existants s'avèrent primordiale pour la maîtrise du risque résiduel lié à leur rupture sous l'effet de la pression interne dynamique de l'eau acheminée. Une nouvelle méthode de surveillance non-intrusive a été proposée pour détecter à temps réel et sous certaines conditions, la formation, l'endroit et la sévérité d'une éventuelle faiblesse locale de la rigidité de la paroi des puits blindés.

En effet, la détérioration locale de la rigidité de la paroi de ces structures crée un changement des paramètres hydroacoustiques de la région concernée (changement de la célérité de l'onde, et/ou de la section de l'écoulement, A) (Wylie & Suo, 1993, Hachem & Schleiss, 2010). Les limites (ou jonctions) de ces régions affaiblies constituent des barrières sur lesquelles une onde incidente sera décomposée en une onde qui transite vers l'aval et une autre qui se réfléchit vers

l'amont (figure 3). L'idée clef de la méthode de surveillance repose sur l'analyse et le traitement de ces signaux de pression dynamique et de la vibration radiale du blindage engendrée par celle-ci et mesurés aux deux extrémités accessibles du puits.

3.2 Vérification par des essais sur modèle physique à échelle réduite

3.2.1 Description de l'installation d'essai

L'influence de la détérioration locale de la rigidité de la paroi des puits et galeries blindés sur la célérité et l'atténuation de l'onde de pression durant les phénomènes transitoires a été étudiée expérimentalement. La formation des zones de faible rigidité dans un puits blindé peut être une conséquence de la détérioration ou de la déformation excessive du béton de remplissage et du massif rocheux qui entourent le blindage. Une méthode innovatrice pour détecter la présence de ces portions de faible rigidité a été proposée et validée par des séries d'essais sur modèle physique à échelle réduite (Hachem & Schleiss, 2011b).

L'installation est constituée d'une conduite d'essai de 150 mm de diamètre intérieure et de 6.25 m de longueur (figure 4). Un réservoir, une pompe à vitesse variable et une conduite en PVC alimentent en eau un réservoir à air comprimé situé à l'amont de la conduite d'essai. Cette dernière est construite par l'assemblage de plusieurs pièces de longueurs égales à 0.5 m et 1 m (figure 5). Les flasques de connexion servent comme points de fixation de la conduite d'essai contre la dalle et le mur en béton du laboratoire. Une vanne type guillotine équipée par un piston à air comprimé assure la fermeture rapide et la génération des coups de bélier

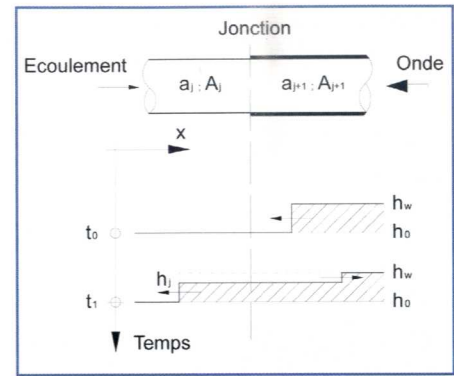


Figure 3. Transition et réflexion d'une onde de pression incidente ($h_w - h_0$) en traversant une jonction qui sépare deux régions de puits de caractéristiques hydroacoustiques distinctes.

dans la conduite d'essai. Un compresseur alimente le piston de la vanne par le volume et la pression d'air nécessaire pour son fonctionnement. Deux capteurs infrarouges indiquent les positions de fermeture et d'ouverture complète de la vanne guillotine. Un débitmètre, deux vannes de sécurité et deux raccords flexibles complètent le circuit fermé du stand d'essai. L'acquisition des données a été faite en utilisant deux capteurs de pression type «HKM-375M-7-BAR-A, Kulite», deux géophones type «I/O Nederland, SM-6 4.5Hz 3500 ohm», une carte d'acquisition «NI-USB-6259-M» et un ordinateur équipé par un programme de contrôle et d'acquisition préparé sur la plateforme du logiciel LabVIEW 8.6.

Un nombre total de 2 configurations différentes de la conduite d'essai ont été testées (figure 5). Les tronçons de faible rigidité ont été modélisés en remplaçant les parties en acier par des conduites fabriquées en aluminium ou PVC. Les mêmes conditions initiales stationnaires de débit et de pression ont été adoptées pendant les 12 essais répétitifs

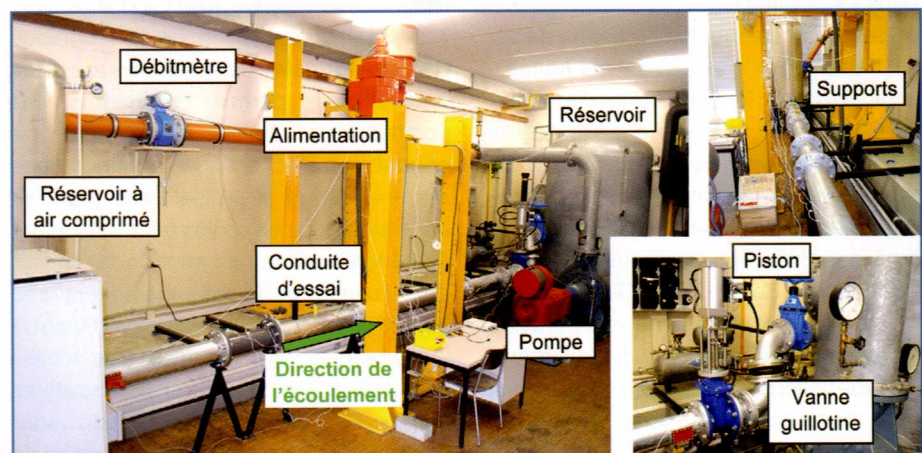


Figure 4. Modèle physique à échelle réduite construit au Laboratoire de Machines Hydrauliques (LMH) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

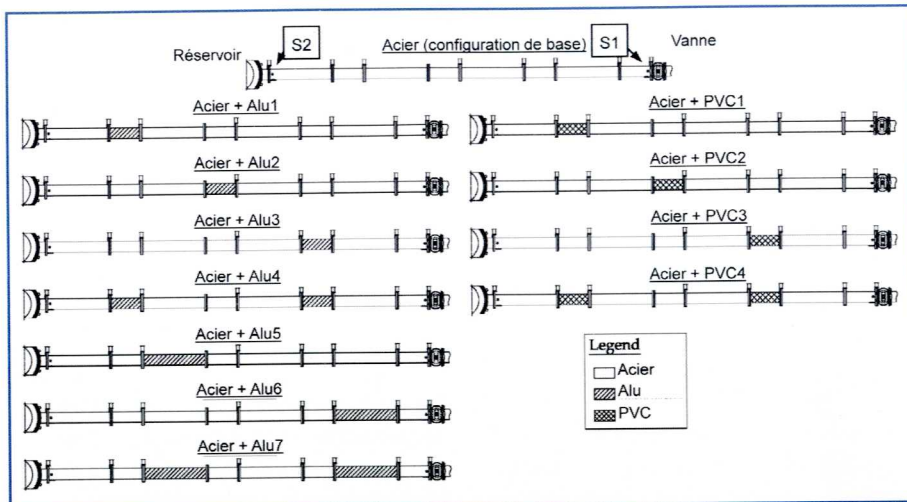


Figure 5. Les différentes configurations testées de la conduite d'essai de l'installation physique.

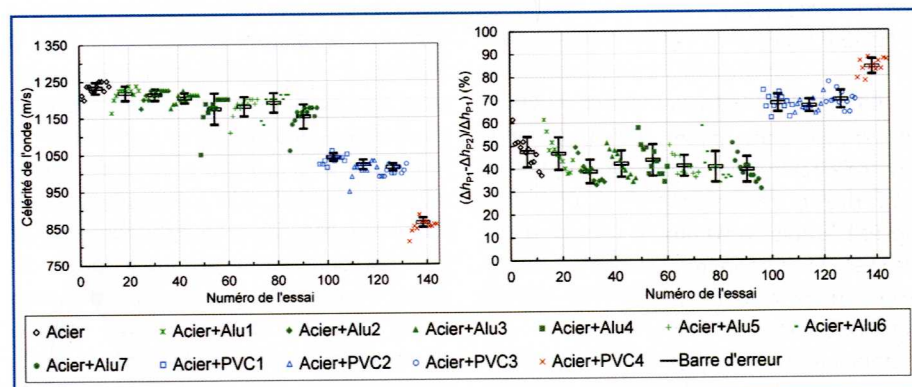


Figure 6. A gauche, les célérités de coup de bélier et, à droite, les atténuations de leur amplitude à l'intérieur de la conduite d'essai entre les points de mesures S1 et S2 pour les 12 configurations testées.

réalisés sur chacune des configurations présentées à la figure 5. Une description plus détaillée de l'installation physique est disponible dans Hachem (2011c).

3.2.2 Analyses des résultats expérimentaux

Les signaux des pressions dynamiques et des vibrations radiales de la paroi de la conduite d'essai ont été mesurés à ses deux extrémités (S1 et S2 sur la figure 5) durant les évènements des coups de bélier. Les signaux mesurés ont été traités et analysés dans Hachem & Schleiss (2011d and 2011e) en utilisant, entre autres, la transformation de Fourier (Lyons, 1997), les ondelettes (Mallat, 1990, Mathworks, 2008), la technique de cross-corrélation et la réponse fréquentielle du système (Lang, 1987, Shin & Hammond, 2008).

La figure 6 présente les célérités et les atténuations de l'amplitude de l'onde de coup de bélier estimées à partir de l'analyse des pressions mesurées pendant les essais effectués sur les 12 configurations de la conduite. Le traitement des signaux des deux géophones par les fonctions de

transfert a donné des résultats similaires à ceux obtenus à partir des mesures de pression avec une erreur relative maximale de l'ordre de 6%. Les résultats montrent que la célérité et l'atténuation de l'onde de pression sont deux facteurs qui peuvent être considérés comme indicateurs globaux de la formation d'une faiblesse locale importante dans la rigidité de la paroi des conduites, puits et tunnels blindés (Hachem & Schleiss, 2011f and 2011g).

La combinaison de la technique de transformation de Fourier avec les ondelettes a permis l'estimation des positions des limites de la pièce de conduite en PVC dans les configurations «Acier+PVC1, 2 et 3». Cela était possible dans le cas où des ondes à front raide ont été générées par la transmission de l'impact de l'air comprimé depuis le piston vers l'eau dans la conduite à travers l'axe verticale de la vanne guillotine. Les distances réelles et estimées ainsi que les erreurs relatives commises par cette estimation sont présentées à la figure 7. L'erreur maximale commise dans l'estimation des distances des limites de faiblesse correspond à

la configuration «Acier+PVC2» de la conduite d'essai. Cela est probablement lié à l'interférence des ondes réfléchies de la faiblesse avec celles des oscillations du premier mode de vibration de la conduite d'essai. Ces oscillations sont relativement importantes en raison de l'absence d'un appui horizontal à l'endroit du flasque aval de la faiblesse (figure 4). Une fois les deux limites de la faiblesse sont localisées, la sévérité du changement de la rigidité de la conduite a pu être estimée avec des erreurs relatives minimale et maximale de 12.3% et 21.8%, respectivement.

3.3 Application de la méthode de surveillance à l'échelle de prototype

3.3.1 Description du site

Le puits blindé de la centrale de pompage-turbinage de Grimsel II de la compagnie KWO (Kraftwerke Oberhasli AG), a été équipé par deux capteurs de pression et deux géophones. Ces capteurs ont été placés aux deux extrémités accessibles du puits blindé à l'entrée de la centrale et sur la vanne papillon de sécurité entre le système de chambre d'équilibre amont constitué par une chambre verticale et un puits incliné (figure 8). Une description plus détaillée du site est disponible sur le site de KWO (www.grimselstrom.ch) et dans le rapport de thèse Hachem (2011c).

3.3.2 Résultats et analyses des mesures effectuées sur le prototype

Des mesures in-situ ont été effectuées pour valider la méthode de détection et de localisation des tronçons de puits de faible rigidité. Les données de pression et de vibration ont été récoltées d'une manière automatique et continue avec deux systèmes d'acquisition séparés. Ces systèmes ont été synchronisés par le moyen d'une connexion Ethernet via un câble en fibre optique. Le contrôle et la récupération des données ont été effectués en ligne par le moyen d'une liaison internet sécurisée (VPN). Un nombre total de 396 fichiers de mesure ont été récoltés entre début février et début juin 2011. La figure 9 montre un exemple des pressions dynamiques acquises par les deux capteurs de pression aux stations S1 et S2.

Il est à signaler que les petites amplitudes des variations de pression, le niveau relativement important du bruit et la sensibilité des géophones à ces bruits ont rendu difficile l'exploitation des mesures faites par ces capteurs.

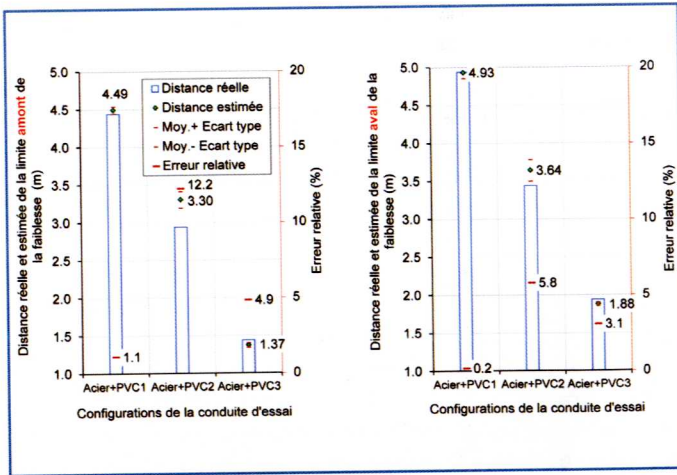


Figure 7. Moyennes et écart types des distances estimées de la limite amont (à gauche) et aval (à droite) de la faiblesse en PVC par rapport à la position de la station de mesure S1 pour les 3 configurations «Acier+PVC1, 2 et 3». Les distances réelles et les erreurs relatives sont encore présentées pour comparaison.

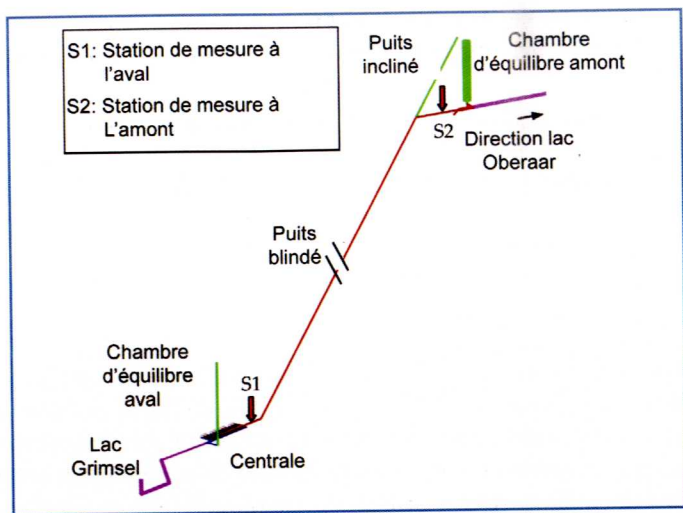


Figure 8. Schéma du puits blindé de l'aménagement de pompage-turbinage de Grimsel II. Les deux stations de mesures S1 (à l'entrée de la centrale) et S2 (entre le puits incliné et la chambre d'équilibre verticale) sont encore indiquées.

Différentes approches ont été appliquées dans le but d'estimer la célérité et l'atténuation d'énergie de l'onde de pression générée par les coups de bélier durant l'enclenchement et l'arrêt des pompes et des turbines. Les faibles variations de pression dynamique de service combinées avec l'existence d'une masse rocheuse homogène entourant le blindage ont rendu difficile l'application de la totalité de la procédure de surveillance proposée. Néanmoins, des graphes de surveillance basés sur la méthode de contrôle de qualité (Montgomery, 2005) ont pu être établis pour les deux indicateurs, à savoir, la célérité et le coefficient exponentiel de dissipation de l'onde (figure 10) (Hachem & Schleiss, 2011h). La vitesse de l'onde a été estimée à partir de la transformation de Fourier des pressions mesurées à la station S1. Quant au coefficient d'atténuation, il a été déterminé par un calcul de RMS du signal de pression S1 suivi d'une régression exponentielle. Les signaux de pression mesurés à S2 n'ont pas pu être utilisés pour estimer la célérité et l'atténuation de l'onde dans le puits blindé de Grimsel II. Ceci est dû à la réflexion de 75% de l'énergie des coups de bélier incidents de S1 vers S2 par le puits incliné à surface libre présent entre ces deux stations (figure 8). L'absence de ce puits dans d'autres aménagements pourra améliorer les résultats de la méthode de surveillance proposée dans cet article. Trois limites de contrôle qui représentent l'état actuel de la rigidité de la paroi du puits blindé ont été définies sur les graphiques de surveillance. Ces limites ainsi que les tendances globales des nuages des points actuels

et futures seront utilisés pour surveiller la paroi du puits blindés. Les limites de contrôle relatives à la vitesse de l'onde sont provisoires et doivent être révisées après l'acquisition d'une plus longue série de mesures. Les limites qui correspondent au coefficient exponentiel de dissipation de l'onde durant l'enclenchement des pompes et turbines peuvent être utilisées pour la surveillance du puits blindé. Durant les modes de fermeture des machines hydrauliques, les valeurs de coefficient de dissipation ont subi un changement de 55%. Pour expliquer ce décalage, des longues séries de mesure de pression sont nécessaires.

4. Conclusions

La demande importante de l'énergie de pointe exige des réglages rapides et multiples de la puissance des turbines et/ou des pompes dans les centrales hydro-électriques. Les sollicitations dynamiques sont ainsi amplifiées et les marges de sécurité pourraient être réduites. La rupture de blindage des puits et galeries de ces centrales sous l'effet des pressions

dynamiques intérieures peut avoir des conséquences catastrophiques. Les pertes économiques générées par l'arrêt de production pour vider, ausculter et éventuellement réparer ces ouvrages sont considérables.

Dans le cadre du projet multidisciplinaire HydroNet I, une amélioration des méthodes de dimensionnement ainsi qu'une nouvelle approche de surveillance non-intrusive des puits et galeries blindés a été proposée. Un modèle basé sur le phénomène d'interaction fluide-structure (FSI) a été formulé pour le développement des nouveaux critères de dimensionnement qui considèrent la mécanique de rupture fragile pour analyser la réponse du blindage en acier à haute résistance. Les pressions dynamiques obtenues par l'approche théorique classique des coups de bélier sont peu influencées par la différence de vitesse de l'onde quasi-statique. Néanmoins, le FSI peut engendrer des pressions dynamiques extrêmes et de haute fréquence. La validation du modèle théorique proposé par modélisation numérique et éventuellement par des

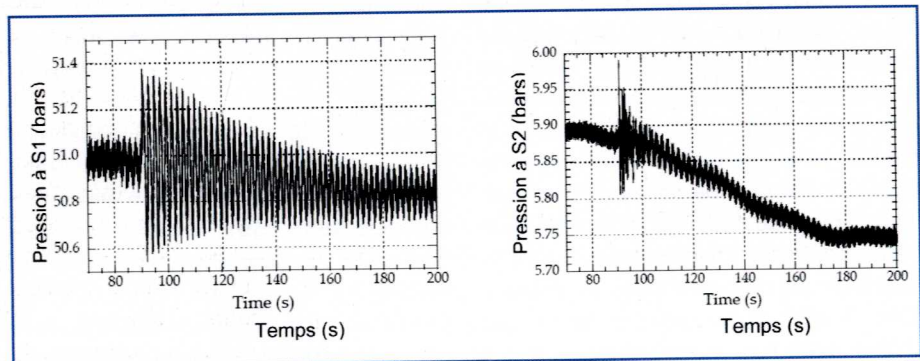


Figure 9. Pressions dynamiques mesurées aux deux stations S1 et S2 sur le puits blindé de Grimsel II durant l'arrêt d'une turbine.

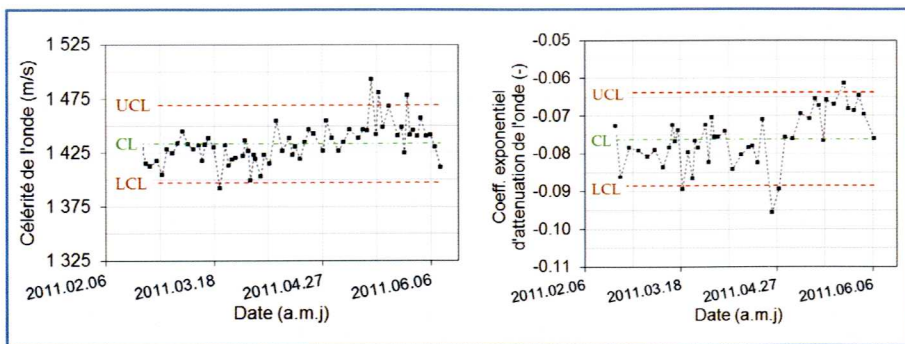


Figure 10. Exemple de graphiques de surveillance de la célérité (à gauche) et du coefficient exponentiel d'atténuation de l'onde (à droite) du puits blindé de la centrale de pompage-turbinage de Grimsel II. UCL, CL et LCL sont, respectivement, les limites statistiques supérieure, moyenne et inférieure de contrôle de la célérité et du coefficient d'atténuation de l'onde.

mesures sur modèle physique et sur prototype sera faite dans le cadre d'une future recherche qui se déroulera sous le projet HydroNet II.

La validation expérimentale de la nouvelle méthode de surveillance a montré que la vitesse de propagation et le coefficient d'atténuation des ondes sont des indicateurs valables de la présence d'une faiblesse locale importante dans la rigidité radiale des puits et galeries blindés. Cette méthode repose sur le traitement et l'analyse des signaux de pression dynamique et de vibration mesurés aux deux extrémités accessibles de ces ouvrages. Elle est capable de localiser l'endroit d'une seule et importante faiblesse. Quand des ondes à front raide sont générées, il est possible de localiser les deux extrémités de la faiblesse avec une erreur maximale de 12.2%. La sévérité du changement de la rigidité de la paroi a pu être estimée avec des erreurs relatives minimale et maximale de 12.3% et 21.8%, respectivement.

Des mesures in-situ sur un aménagement de pompage-turbinage ont été effectuées pour valider la méthode de détection et de localisation des tronçons de puits de faible rigidité. Les faibles variations de pression dynamique et l'existence d'une masse rocheuse homogène de haute résistance autour du blindage ont rendu difficile l'application de la totalité de la procédure de surveillance. Néanmoins, des graphiques de surveillance pour la célérité et le coefficient exponentiel de dissipation de l'onde ont pu être établis. Trois limites de contrôle qui représentent l'état actuel de la rigidité de la paroi du puits blindé ont été définies sur ces graphiques. Ces limites ainsi que les tendances globales des nuages de points actuels et futures peuvent être utilisés pour surveiller l'état du puits blindé.

Remerciements

La présente recherche fait partie du projet interdisciplinaire HydroNet I qui est financé par Swiss Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH), Swisslectric research et l'Office Fédéral de l'énergie (OFEN). Les auteurs tiennent à remercier la Fondation Lombardi pour la précieuse aide financière dédiée à la construction du modèle physique expérimental. Un grand merci est également attribué à Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) pour leur support technique offert durant les mesures sur le prototype. Une appréciation particulière est adressée au Prof. Didia Covas de l'IST de Lisbonne pour ses commentaires et suggestions formulés durant son séjour à l'EPFL comme professeur invité.

Références

Hachem, F.E., Schleiss, A.J. (2009). The design of steel-lined pressure tunnels and shafts. *International Journal on Hydropower & Dams*, 16(3), 142–151.

Hachem, F.E., Schleiss, A.J. (2010). Influence of local stiffness of conduits on water hammer propagation signal. *Proceedings of the First European IAHR Congress*, www.iahr.net, Edinburgh.

Hachem, F.E., Schleiss, A.J. (2011a). A review of wave celerity in frictionless and axisymmetrical steel-lined pressure tunnels. *Journal of Fluids and Structures*, 27, 311–328.

Hachem, F.E., Schleiss, A.J. (2011b). Monitoring of steel-lined pressure shafts and tunnels. *International Journal on Hydropower & Dams*, 18(3), 74–77.

Hachem, F.E. (2011c). Monitoring of steel-lined pressure shafts considering water-hammer wave signals and fluid-structure interaction. PhD thesis No 5171 (2011), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland.

Hachem, F.E., Schleiss, A.J. (2011d). Detection of local wall stiffness drop in steel-lined pressure tunnels and shafts of hydroelectric power plants using steep pressure wave excitation and wa-

velet decomposition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1), 35–45.

Hachem, F.E., Schleiss, A.J. (2011e). Effect of drop in pipe wall stiffness on water-hammer speed and attenuation. *Journal of Hydraulic Research* (accepted for publication).

Hachem, F.E., Schleiss, A.J. (2011f). Physical tests estimating the water-hammer wave speed in pipes and tunnels with local weak wall stiffness. *Proceedings of the 2011 World Environmental & Water Resources Congress (EWRI)*, Palm Springs, California, May 22–26, 2011.

Hachem, F.E., Schleiss, A.J. (2011g). Monitoring of steel-lined pressure shafts using water-hammer records and wavelet filtering and decomposition. *Proceedings of the 34th IAHR Congress 2011*, Brisbane, Australia, 26 June to 1 July, 2011.

Hachem, F.E., Schleiss, A.J. (2011h). On-line monitoring of steel-lined pressure shafts by using pressure transient signals under normal operation conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, accepted for publication.

Halliwel, A. (1963). Velocity of a waterhammer wave in an elastic pipe. *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, 89, 1–21.

Jaeger, C. (1977). *Fluid transients in hydro-electric engineering practice*. Blackie and Son Limited, Glasgow and London.

Lang, F. (1987). *Correlation Techniques*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Lyons, R. (1997). *Understanding digital signal processing*. Addison-Wesley, USA.

Mallat, S. (1990). *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, San Diego, CA.

Mathworks, (2008). MATLAB, Natick, Mass, www.mathworks.com.

Montgomery, D. (2005). *Introduction to statistical quality control*. John Wiley and Sons, Inc., USA, fifth edition.

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

Shin, K., Hammond, J. (2008). *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*. John Wiley and Sons, New York.

Wylie, E., Suo, L. (1993). *Fluid transients in systems*. Prentice Hall, Fascimile Edition.

Adresse des auteurs

Dr. Fadi Hachem, Prof. Dr. Anton Schleiss
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, CH-1015 Lausanne
Tél. +41 21 693 23 85
fhachem@stucky.ch, anton.schleiss@epfl.ch