

<b>Zeitschrift:</b>	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
<b>Band:</b>	107 (2015)
<b>Heft:</b>	1
<b>Artikel:</b>	Simulation numérique des transitoires hydrauliques pour répondre aux nouvelles exigences des réseaux électriques
<b>Autor:</b>	Nicolet, Christophe / Vuignier, Eric
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-941832">https://doi.org/10.5169/seals-941832</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 21.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# **Simulation numérique des transitoires hydrauliques pour répondre aux nouvelles exigences des réseaux électriques**

Christophe Nicolet, Eric Vuignier

## Résumé

Les aménagements hydroélectriques contribuent de manière importante à la stabilité des réseaux électriques grâce à leur flexibilité d'exploitation et leur capacité à fournir des services systèmes tels que du réglage primaire, secondaire et tertiaire. Ces services impliquent des démarrages et arrêt fréquents ainsi que des variations de charge régulières qui sollicitent les équipements et induisent des transitoires hydrauliques. Ceci, combiné avec la modernisation des systèmes de contrôles commandes et le pilotage à distance des centrales, rend possibles des cas de charge de transitoires hydrauliques qui étaient peu probables lors de la conception des aménagements. Cette modification des modes d'exploitation des aménagements hydroélectriques requiert une analyse détaillée des régimes transitoires hydrauliques prenant en compte ces nouveaux cas de charge. Cette démarche est illustrée dans le cas de l'aménagement de Electra-Massa situé en Valais qui a récemment fait l'objet d'une réhabilitation accompagnée d'une étude des transitoires hydrauliques comprenant les phases suivantes: modélisation, validation, calculs transitoires, identification des situations à risques, recherche des solutions et mise en œuvre des solutions retenues. Parmi les cas de charges normaux, exceptionnels et accidentels, les cas de fermeture des injecteurs de turbine Pelton dans le temps de réflexion d'onde du puits blindé, connu sous le nom de Pic de Michaud, et le cas de variations de charge en phase avec la cheminée d'équilibre sont abordés plus en détail.

## 1. Introduction

Motivé par une volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les risques associés aux centrales nucléaires, les nouvelles énergies renouvelables connaissent un essor important en Europe depuis plusieurs années avec une contribution prépondérante des énergies éolienne et solaire, [1], [2], [3]. Dans ce nouveau contexte énergétique, combiné à la libéralisation des marchés de l'électricité, la stabilité des réseaux électriques représente un enjeu majeur [4] ayant nécessité l'introduction de normes sur les réseaux de transmission toujours plus strictes, [5], [6]. Avec une grande flexibilité d'exploitation, des plages de fonctionnement étendues, des temps de réponses très courts et dans certains cas des capacités de stockages importantes, les centrales hydroélectriques apportent une contribution indispensable à la stabilité des réseaux électriques en fournissant des services de réglage primaire, secondaire et tertiaire, et permettent ainsi une plus grande pénétration des énergies

renouvelables [2], [3], [4], [7], [8]. Le prix à payer pour ces prestations à hautes valeurs ajoutées est toutefois une sollicitation plus importante des équipements qui sont soumis à des séquences de démarrages et d'arrêt beaucoup plus fréquentes et des variations de charge régulières et parfois importantes qui peuvent induire un vieillissement prématuré des différents composants de la chaîne de production hydroélectrique, [9], [10]. De plus, la modernisation des équipements de contrôle commande souvent associée avec un pilotage à distance des installations, rendent possibles des séquences de fonctionnement qui n'étaient pas envisageables par le passé, et sont susceptibles d'induire des régimes transitoires hydrauliques qui n'avaient pas été pris en compte lors de la conception des aménagements et dont les amplitudes pourraient dépasser les limites admissibles des installations. C'est pourquoi, dans le cadre de projets de modernisation et/ou d'augmentation de puissance d'aménagements hydroélectriques, il

est important de procéder à une étude détaillée des régimes transitoires hydrauliques en utilisant des outils et des modèles modernes permettant de prendre en compte les nouveaux modes d'exploitations des centrales hydroélectriques afin d'en prédire les conséquences sur les équipements. Cette démarche est illustrée dans cet article par l'étude du cas de l'aménagement de Electra-Massa dont la centrale de Bitsch d'une puissance installée de 340 MW est située en Valais et détenue par ALPIQ Suisse SA (23%), BKW AG (16%), IWB (14%), NOK (14%), ATEL (11.5%), FMV (11.5%), Groupe E (10%) et est exploitée par la société Hydro-Exploitation SA. Les 3 groupes de la centrale de Bitsch ont été totalement réhabilités durant les dernières années. Cet article présente la démarche globale qui a été adoptée pour l'étude détaillée des transitoires hydrauliques réalisée dans le cadre de la réhabilitation, et qui comprend la modélisation numérique de l'aménagement, la validation du modèle, et la simulation de cas de charges normaux, exceptionnels et accidentels. L'identification de dépassements potentiels de limites admissibles s'est ensuite traduite par une recherche de solutions pragmatiques et la mise en œuvre de ces solutions tout en garantissant un maximum de flexibilité d'exploitation.

## 2. Démarche générale

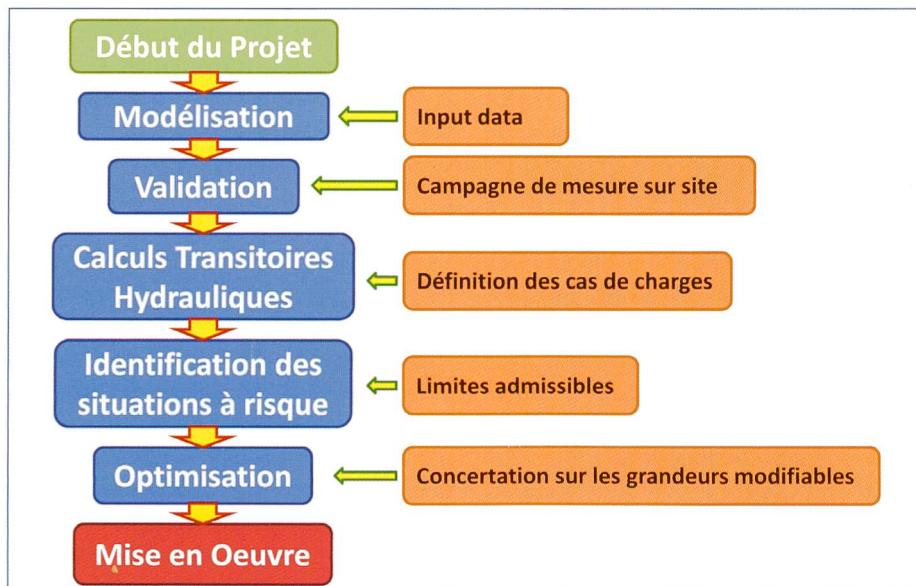
La modélisation et la simulation numérique des transitoires hydrauliques d'un aménagement existant peut avoir différentes sources de motivations telles que la réhabilitation de groupes, une augmentation de puissance, la modernisation de contrôle commande, ou une modification des modes exploitations de l'aménagement comme par exemple la volonté de fournir des services systèmes (réglage primaire, secondaire et tertiaire) ou l'introduction d'un pilotage à distance. Pour l'ensemble de ces cas,



**Figure 1 Turbine Pelton de 100MW du groupe 1 de la centrale de Bitsch de l'aménagement de Electra-Massa.**

la démarche générale recommandée [11] comprend les étapes suivantes, voir Figure 2: (i) une modélisation détaillée des adductions hydrauliques et nécessitant les caractéristiques des retenues, des galeries et conduite forcée, des cheminées d'équilibre, des turbines hydrauliques et de l'ensemble des systèmes de protection (vannes, orifices compensateurs, etc), (ii) une validation du modèle de simulation par comparaison avec des mesures sur site réalisées idéalement pour différentes conditions de fonctionnement, (iii) les calculs transitoires hydrauliques des cas de charges déterminants comprenant les cas normaux, exceptionnels et accidentels, (iv) l'identification des

situation à risques où les grandeurs examinées majorées des marges de sécurité et des marges d'erreur, peuvent conduire à un dépassement des limites admissibles telles que des surpressions ou des dépressions des conduites en charge, des risques de débordement ou de dénoyage des cheminées d'équilibre, des survitesses des groupes, des risques d'entrées d'air (ouverture de soupapes à air), etc, (v) l'élimination des situation à risques par l'optimisation des paramètres de fonctionnement (loi de manœuvres des organes de protection) et des limites d'exploitation, et finalement (vi) la mise en œuvre des solutions préconisées.



**Figure 2. Démarche globale pour l'analyse des régimes transitoires hydrauliques d'un aménagement existant.**

### 3. Application au cas de l'aménagement de Electra-Massa, EM

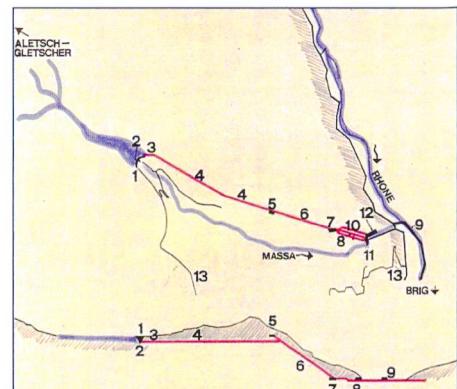
#### 3.1. Description de l'aménagement de Electra-Massa

L'aménagement d'Electra-Massa, qui exploite les eaux de fontes du glacier d'Aletsch a été mis en service en 1969, initialement avec 2 groupes Pelton d'une puissance totale de 200 MW, et a ensuite été doté d'un troisième groupe Pelton d'une puissance de 140 MW mis en service en 1980 et portant la puissance totale de l'aménagement à 340 MW. Les caractéristiques principales de l'aménagement de Electra-Massa sont présentées en Tableau 1. Le groupe 3 d'une puissance de 140 MW était alors le groupe Pelton le plus puissant installé en Suisse, avant la mise en service de la centrale de Bieudron. La centrale de Bitsch a fait récemment l'objet d'une réhabilitation des 3 groupes qui a conduit à une réflexion sur les limites de fonctionnement de l'aménagement.

La Figure 3 présente une vue en

Barrage de Gebidem	
Volume total	9.2 Mm <sup>3</sup>
Niveau maximum	1436.5 msm
Niveau minimum	1360 msm
Adduction	
Longueur galerie d'aménée	2624.5 m
Diamètre galerie d'aménée	3 m / 3.4 m
Cheminée d'équilibre	Puits incliné à 70% de diamètre 4.5m avec chambre d'expansion supérieure
Longueur puits blindé	1120 m
Diamètre puits blindé	2.5 m / 2.35 m
Centrale de Bitsch	
Puissance totale installée	340 MW
Débit total d'équipement	55 m <sup>3</sup> /s
Chute brute maximale	743.5 mCE
Altitude de l'axe des répartiteurs	693msm
Nombre et type de groupes	3 groupes Pelton axe verticaux
Vitesse de rotation nominale	375 tr/min
Puissance unitaire et nombre d'injecteurs	Groupe 1 : 100 MW avec 4 injecteurs Groupe 2 : 100 MW avec 4 injecteurs Groupe 3 : 140 MW avec 5 injecteurs

**Tableau 1. Caractéristiques de l'aménagement de Electra-Massa.**



**Figure 3. Vue en situation et profil en long de l'aménagement d'Electra-Massa.**

situation ainsi que le profil en long de l'aménagement de Electra-Massa et la Figure 4 présente l'arrangement particulier des répartiteurs dans la centrale de Bistch pour l'alimentation des 3 groupes Pelton. L'aménagement comprend le barrage de Gebidem d'un volume de 9.2 Mm<sup>3</sup>, une galerie d'amenée en charge de 2624.5 m de long, pouvant être alimentée par 2 prises d'eau différentes selon le niveau dans le barrage afin de minimiser le transport de sédiments, une cheminée d'équilibre, la conduite forcée de 1120 m de long, la centrale de Bistch avec les 3 groupes Pelton, et les canaux aval de restitution à la rivière Massa.

### 3.2. Modélisation

La Figure 5 présente le modèle de simulation de l'aménagement de Electra-Massa élaboré au moyen du logiciel de simulation SIMSEN, développé par l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, EPFL, [12], [13], [14], et qui comprend la retenue amont, la galerie d'amenée, la cheminée d'équilibre, la conduite forcée, le répartiteur et les 3 groupes Pelton. Le modèle est établi sur la base des plans de l'aménagement et des caractéristiques hydrauliques des différents composants. Ainsi, le modèle des conduites prend en compte le comportement élastique des conduites, les effets d'inerties ainsi

que les pertes de charges distribuées; le modèle de la cheminée d'équilibre prend en compte le comportement de stockage ainsi que les effets d'inerties de la colonne d'eau engagée dans la cheminée d'équilibre dont la longueur dépend du niveau d'eau, et les pertes de charges singulières asymétriques associées à la jonction entre la cheminée d'équilibre et la galerie; les vannes modélisées par leurs caractéristiques de débit en fonction de la course de l'obturateur; les injecteurs de turbine Pelton modélisés au travers de leur caractéristiques de débit en fonction de la course des pointeaux; et finalement les temps de manœuvres des injecteurs et

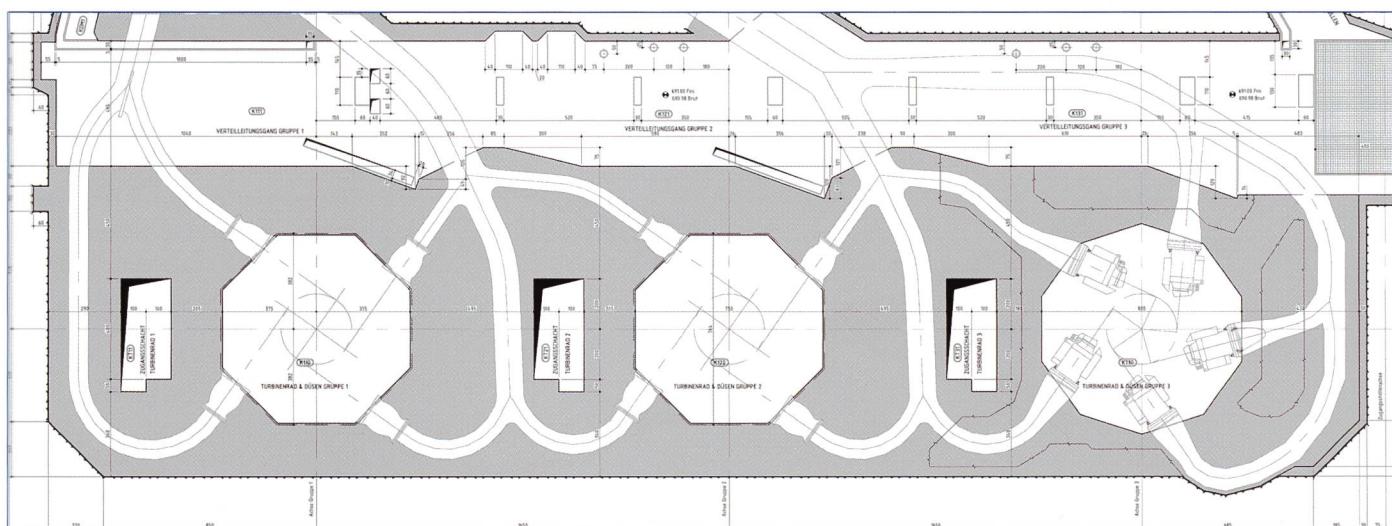


Figure 4. Vue en plan du répartiteur des 3 groupes Pelton de la centrale de Bitsch.

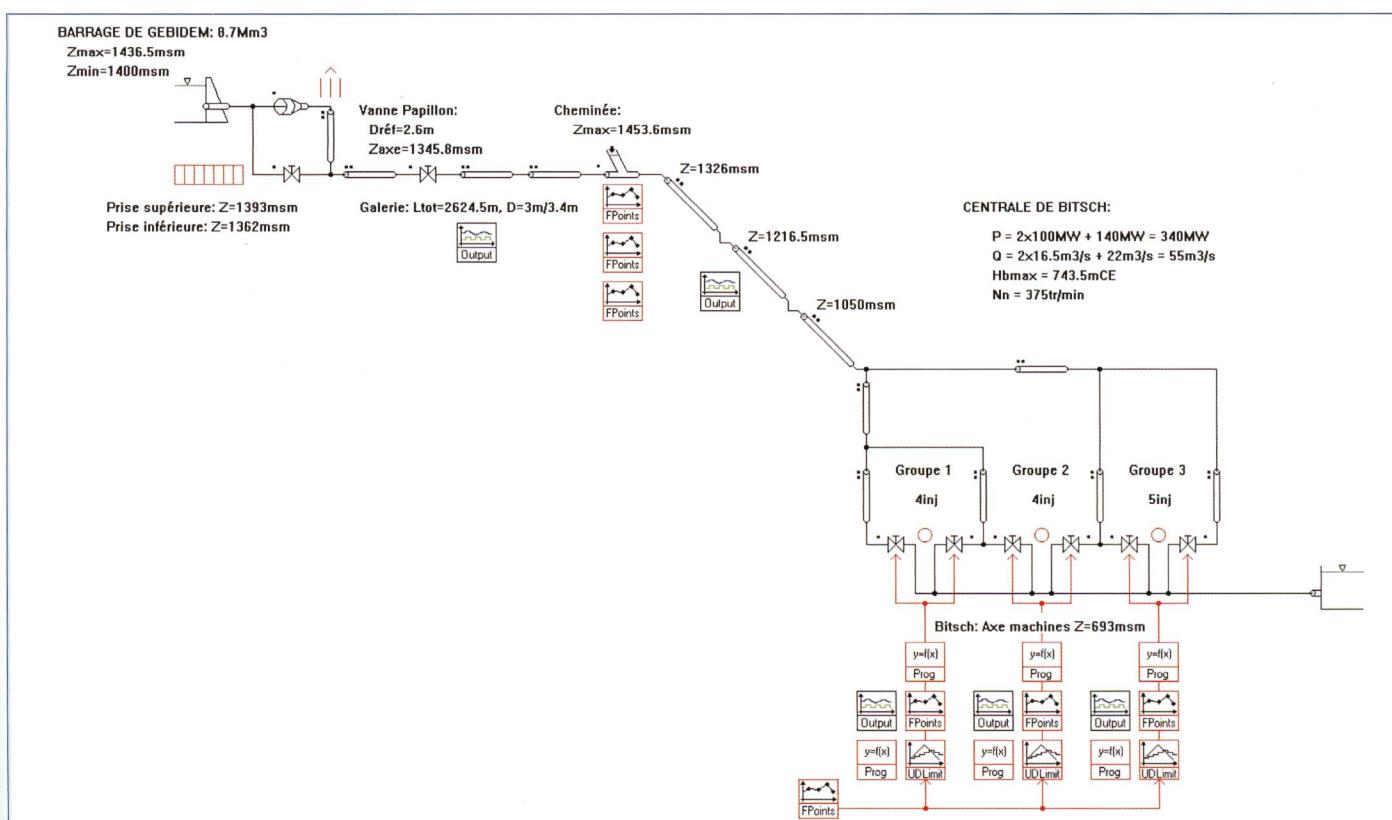


Figure 5. Modèle SIMSEN de l'aménagement de Electra-Massa avec les 3 groupes Pelton d'une puissance totale de 340MW.

des vannes définis pour le fonctionnement normal et les cas d'urgence.

### 3.3. Validation

Une phase importante du projet est la validation du modèle de simulation par la comparaison entre les résultats de simulation et des mesures sur site. Pour ce faire, une campagne d'essais a été organisée en collaboration avec la société Hydro Exploitation qui a réalisé les mesures sur site, afin de confronter mesures et simulation et permettre une éventuelle calibration du modèle. Deux essais ont été réalisés: l'arrêt d'urgence du groupe 3 seul à 140 MW et l'arrêt d'urgence simultané des groupes 2 et 3 à une puissance totale de 240 MW depuis régime permanent. La Figure 6 et la Figure 7 présentent la comparaison entre

mesure et simulation pour le cas d'arrêt d'urgence des deux groupes à 240 MW avec une représentation de l'évolution de la pression au pied du puits blindé qui permet en Figure 6 de vérifier que le modèle reproduit correctement les effets de coup de bâlier dans le puits blindé et en Figure 7 de vérifier que les oscillations de masses entre la cheminée d'équilibre et la retenue de Gebidem sont également bien reproduites. La comparaison entre la mesure sur site et les résultats de simulation permettent de calibrer les grandeurs qui présentent des incertitudes comme la vitesse de propagation d'onde dans les conduites, les pertes de charge linéaires des conduites, et les pertes de charges singulières au pied de la cheminée d'équilibre. Cela permet également de valider les temps de manœuvres

des différents organes de protection. Cette validation permet de réduire les incertitudes du modèle, et ainsi de consolider les données d'entrées qui sont souvent issues de documents anciens et parfois difficiles à obtenir ou à confirmer.

## 4. Etude des transitoires hydrauliques

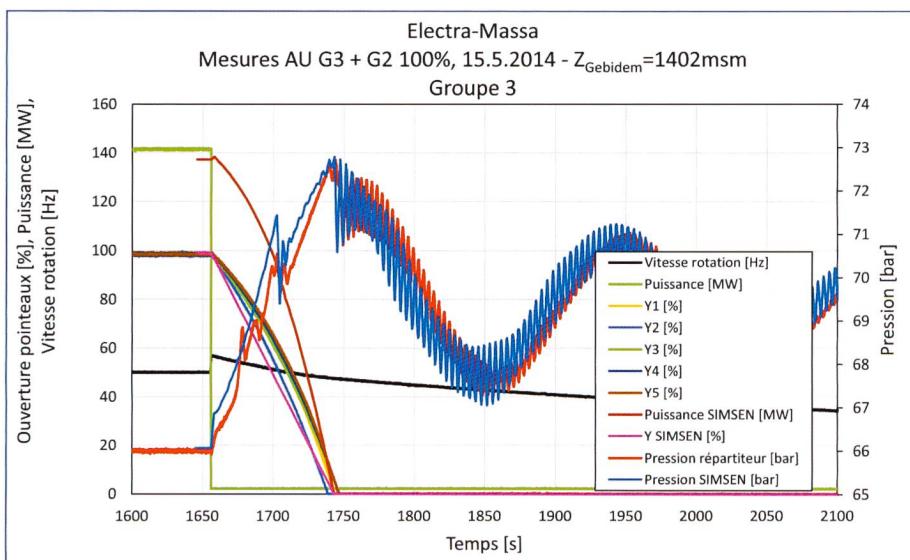
### 4.1. Cas de charges étudiés

Une fois le modèle de simulation dûment validé, il est possible de procéder à la simulation des cas de charges normaux, exceptionnels, et accidentels qui peut comprendre notamment les cas suivants:

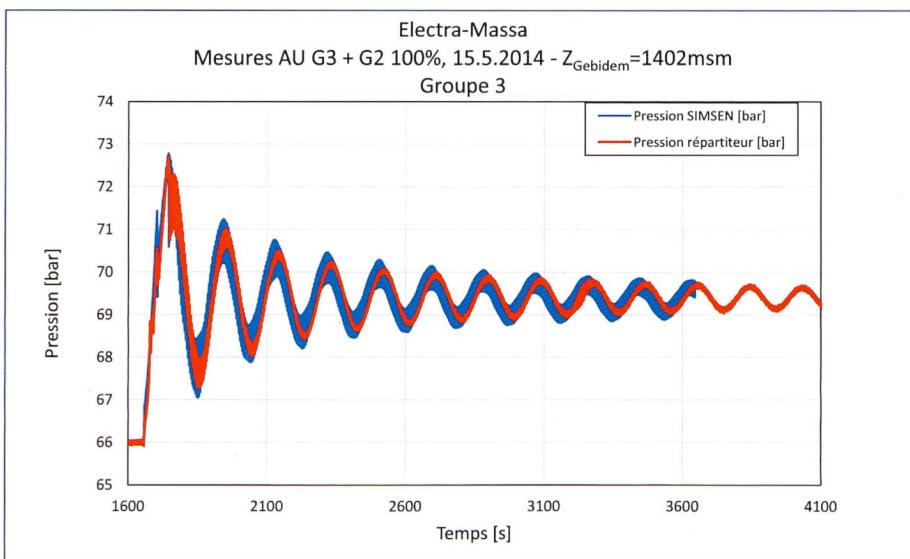
- Cas normaux (fonctionnement normal incluant les démarrages et arrêts normaux ainsi que les cas d'arrêt d'urgence et les enchainements d'événements normaux):
  - Arrêt d'urgence à pleine charge en régime stabilisé;
  - Prise de charge suivie d'un arrêt d'urgence au pire moment;
  - Fermeture des injecteurs dans le temps réflexion d'onde  $2L/a$ , i.e. le Pic de Michaud;
  - Prise de charge des groupe (simultané, différé, par palier, etc);
  - Baisse de charge et reprise de charge au pire moment;
  - Variation de la charge en phase avec la cheminée d'équilibre;
- Cas exceptionnels (survenant en cas de dysfonctionnement d'un composant):
  - Injecteurs bloqués induisant la fermeture de vanne en eau-vive ;
  - Fermeture intempestive de vannes (vanne de prise au barrage, vanne de tête de conduite forcée, vanne de groupe);
- Cas accidentels (survenant en cas de rupture d'un composant):
  - Rupture d'une tige d'injecteur induisant une fermeture instantanée de l'injecteur;
  - Rupture d'injecteur induisant un débit de gueule bée d'injecteur;
  - Rupture d'une conduite avec fermeture de vanne sous débit de gueule bée.

Dans le cadre de cet article, deux cas de charge normaux qui n'étaient pas systématiquement simulés par le passé et qui sont aujourd'hui devenus importants de par les nouveaux modes d'exploitation des aménagements sont présentés:

- Le cas de fermeture des injecteurs dans le temps de réflexion d'onde; connu sous le nom de pic de Michaud;



**Figure 6. Comparaison entre simulation et mesures sur site du comportement transitoire du groupe 3 en cas d'arrêt d'urgence simultané des groupes 2 et 3 à une puissance totale de 240 MW.**



**Figure 7. Comparaison entre simulation et mesures sur site de la pression au pied du puits blindé sur une longue durée qui reflète le niveau dans la cheminée d'équilibre en cas d'arrêt d'urgence simultané des groupes 2 et 3 à une puissance totale de 240 MW.**

- Le cas de variation de charge en phase avec la cheminée d'équilibre.

#### 4.2. Fermeture des injecteurs dans le temps de réflexion d'onde: le Pic de Michaud

Le pic de Michaud est un phénomène connu depuis longtemps (1878 selon [15]), toutefois son risque d'occurrence dans les aménagements de type turbine Pelton n'a pas toujours été considéré lors de la conception des aménagements. Le pic de Michaud correspond à une fermeture des injecteurs depuis une très faible ouverture des injecteurs avec un temps de fermeture correspondant au temps de réflexion d'onde de la conduite forcée:

$$T_{\text{Michaud}} = \frac{2L}{a} \quad (1)$$

Avec: L la longueur totale de la conduite forcée, et a la vitesse de propagation d'onde moyenne dans la conduite forcée. Avec une conduite forcée de 1120 m, et en considérant une vitesse d'onde de 1100 m/s, ce temps correspond à environ 2 s pour l'aménagement de Electra-Massa. Dans ce cas, la surpression induite par coup de bélér dans la conduite forcée peut se calculer avec l'équation de Joukowski selon:

$$\Delta H = \frac{a \cdot Q_o}{g \cdot A} \quad (2)$$

Avec: Q<sub>o</sub> le débit initial dans la conduite forcée, g l'accélération terrestre, et A l'air de la section moyenne de la conduite forcée. Si le temps fermeture est plus important que le temps de réflexion d'onde 2L/a, alors la surpression de coup de bélér peut se calculer en faisant l'hypothèse d'une coupure linéaire du débit selon l'équation suivante:

$$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot Q_o}{g \cdot A} \cdot \frac{1}{T_{\text{fermeture}}} \quad (3)$$

Avec: T<sub>fermeture</sub> le temps de fermeture des injecteurs. En faisant l'hypothèse d'un temps de fermeture identique des trois groupes de Electra-Massa de 32 s, il est possible de calculer selon les équations (2) et (3) la surpression théorique au pied du puits de la conduite forcée de Electra-Massa pour une fermeture depuis un régime permanent établi pour différentes ouvertures initiales des injecteurs. La Figure 8 présente le débit initial de

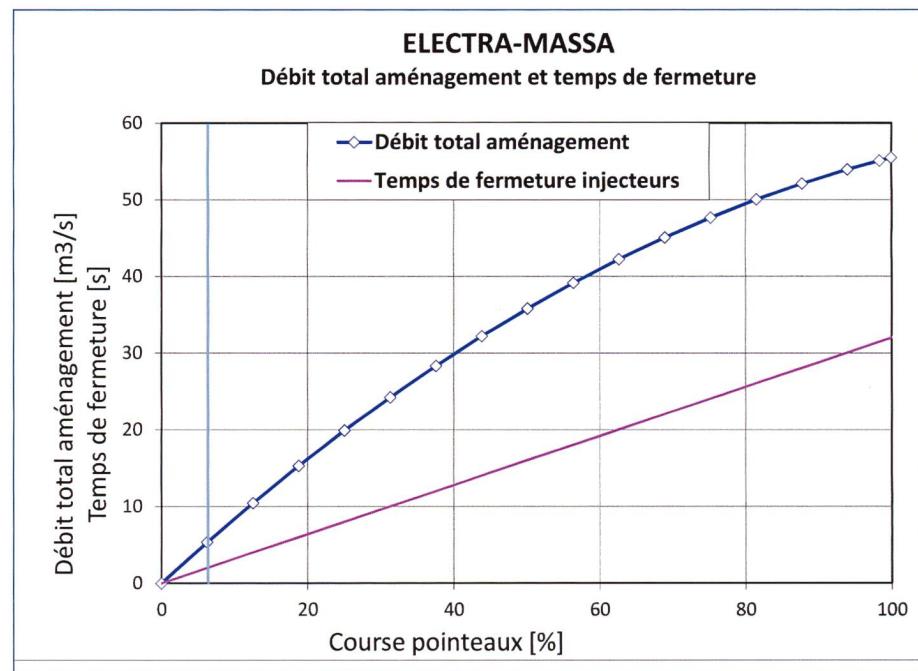


Figure 8. Débit total de l'aménagement d'Electra-Massa en fonction de la course des pointeaux et temps de fermeture des injecteurs correspondants.

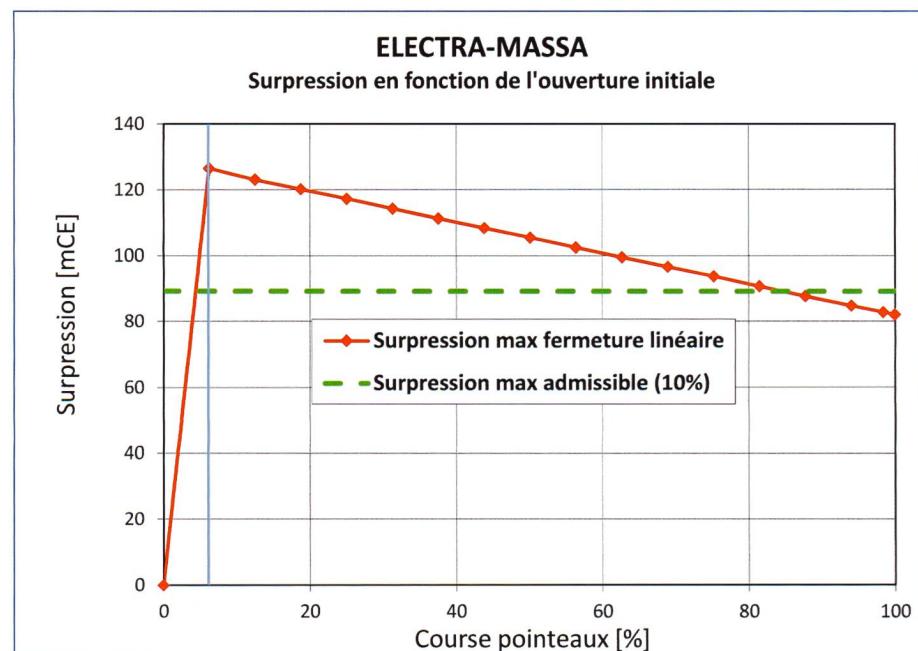
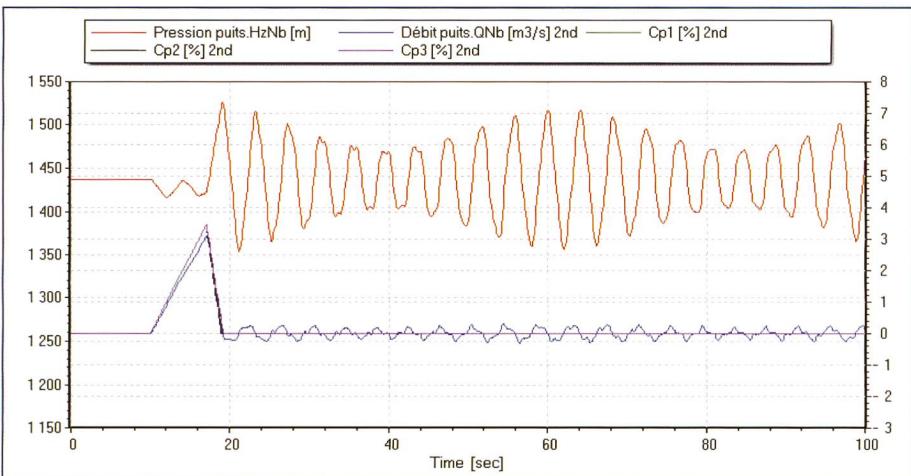


Figure 9. Surpression due au coup de Bélér survenant en cas d'arrêt d'urgence des 3 groupes en fonction de la course initiale des pointeaux avant l'arrêt d'urgence.

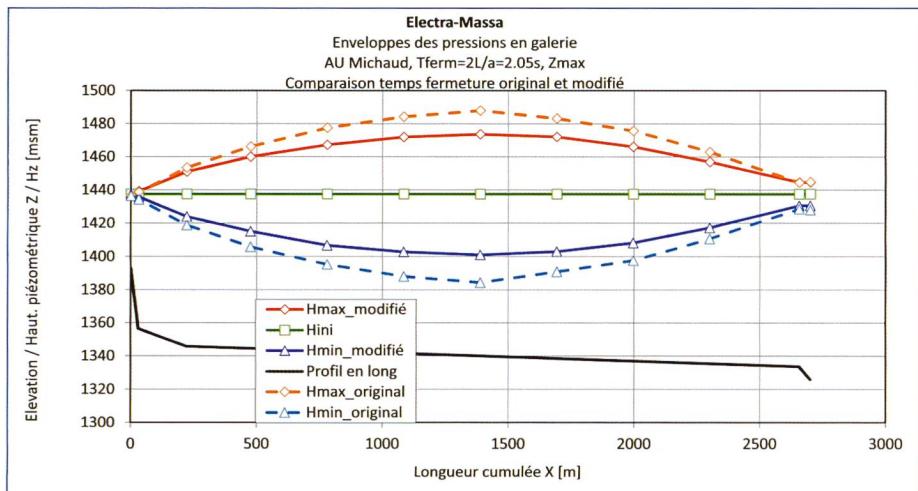
l'aménagement pour les différentes ouvertures d'injecteur et le temps de fermeture correspondant, et la Figure 9 présente la surpression induite par coup de bélér en considérant les temps et débits de la Figure 8.

On constate que la pression maximale théorique induite par le coup de bélér n'est pas obtenue pour l'ouverture maximale et le débit maximal de l'aménagement, mais bien pour l'ouverture initiale correspondant au temps de fermeture 2L/a, [16]. Un cas encore plus défavorable [17], est le cas de prise de charge simultanée des groupes suivi d'un

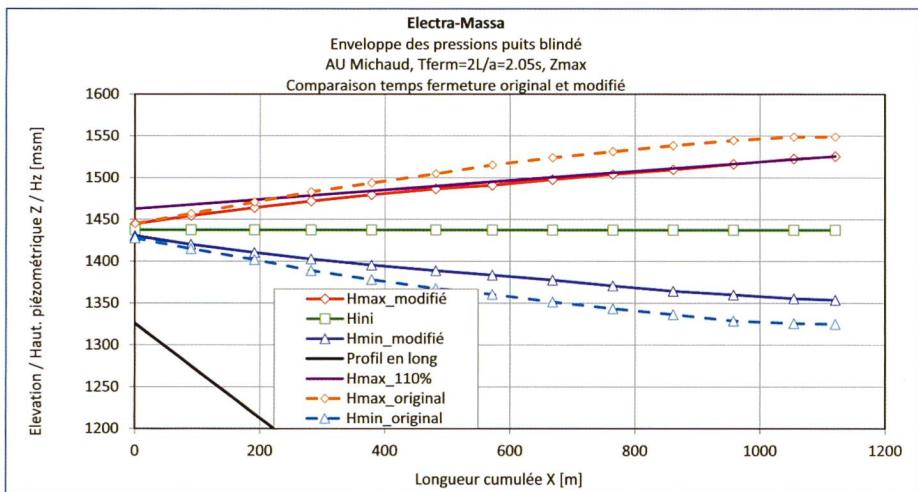
arrêt d'urgence induisant une fermeture dans le temps de réflexion d'onde, comme illustré dans le résultats de simulation de la Figure 10. En effet dans ce cas, il y a une superposition défavorable des ondes de pression induites par l'ouverture des injecteurs avec celles induites par leur fermeture qui amplifient la pression maximale induite par le coup de bélér. Ce cas peu probable lorsque les groupes étaient pilotés manuellement et que la charge sur les groupes était augmentée dès que le groupe était connecté au réseau, est fréquent aujourd'hui puisque les groupes sont généralement synchronisés un à un



**Figure 10.** Résultats de simulation de la course des pointeaux, du débit total et de la pression au pied du puits blindé en cas de prise de charge suivie d'un arrêt d'urgence induisant une fermeture des injecteurs dans le temps de réflexion d'onde  $2L/a$ , i.e. le Pic de Michaud.



**Figure 11.** Enveloppes des pressions minimales et maximales le long de la galerie d'aménée en cas de prise de charge suivie d'un arrêt d'urgence induisant une fermeture des injecteurs dans le temps de réflexion d'onde  $2L/a$ .



**Figure 12.** Enveloppes des pressions minimales et maximales le long du puits blindé en cas de prise de charge suivie d'un arrêt d'urgence induisant une fermeture des injecteurs dans le temps de réflexion d'onde  $2L/a$ .

au réseau, puis fonctionnent pour une courte durée avec les injecteurs fermés ou faiblement ouverts, et la charge est ensuite prise simultanément sur tous

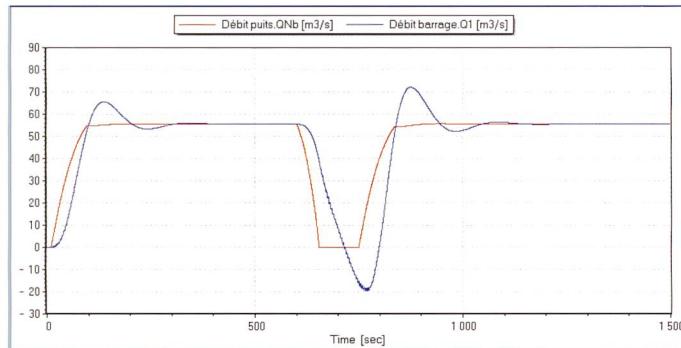
les groupes afin de satisfaire les critères du gestionnaire de réseau, Swissgrid en Suisse, concernant les variations de puissance lors des changements de

puissance définis dans le programme de production qui doivent être réalisés en moins de 10 minutes sous risque de pénalités.

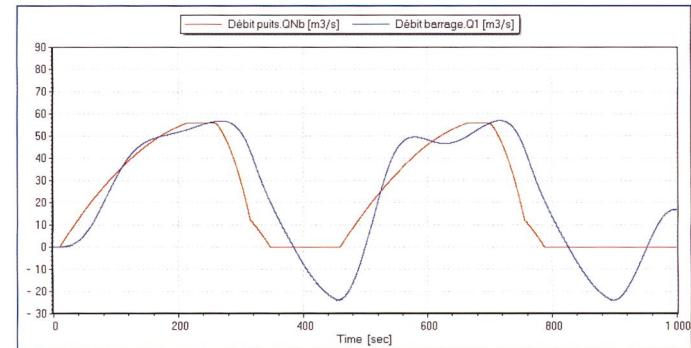
La Figure 11 et la Figure 12 présentent les enveloppes de pressions maximales et minimales obtenues, respectivement le long de la galerie et de la conduite forcée, pour la simulation du cas de la Figure 10 avec les temps de manœuvres originaux et les temps modifiés afin de ramener l'aménagement dans les limites de pression acceptable. On constate que les temps de manœuvres originaux des injecteurs ne permettaient pas de respecter la pression maximale admissible le long de la conduite forcée, voir Figure 12. Il a donc été nécessaire de prolonger le temps de fermeture des injecteurs ainsi que le temps de prise de charge pour satisfaire les limites admissibles. On peut également relever qu'une part non négligeable du coup de bâlier dans la conduite forcée est transmise à la galerie qui présente ici des amplitudes de pression significatives, susceptibles de provoquer des risques de dépression en galerie pour les cotes d'exploitation les plus faibles si il n'y avait pas de limitation de puissance des groupes pour ces cotes. L'enveloppe des fluctuations de pressions dans la galerie en forme de demi-onde suggèrent que ce cas de charge induit une excitation du premier mode propre de la galerie. La part de coup de bâlier transmise à la galerie dépend notamment de l'aire de la section horizontale de la cheminée d'équilibre et de ses pertes de charge singulières [18], mais également des effets d'inerties de la colonne d'eau de la cheminée d'équilibre.

#### 4.3. Variations de charges en phase avec la cheminée d'équilibre

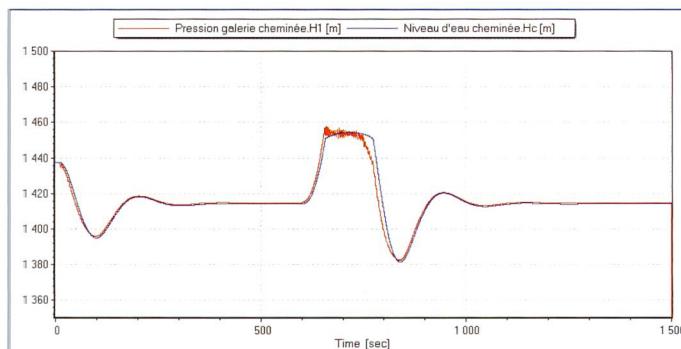
L'amélioration de la flexibilité des aménagements hydroélectrique obtenue grâce à la modernisation des systèmes de contrôles commande et la possibilité de piloter les centrales à distance, rend plus difficile la prédiction de toutes les combinaisons de manœuvres possibles susceptibles de poser des problèmes, notamment en relation avec les oscillations de masses entre la retenue et la cheminée d'équilibre et qui sont caractérisées par des périodes d'oscillations élevées. La Figure 13 et la Figure 14 présentent les résultats d'enchaînements de prise de charge suivie d'une baisse et une reprise de charge simulée avec les temps de manœuvres originaux. On peut constater, voir Figure 13, que le débit au barrage



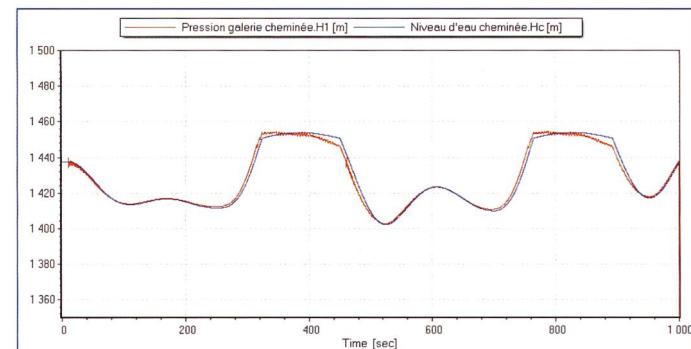
**Figure 13.** Résultats de simulation pour l'évolution du débit au pied du puits blindé et à la prise d'eau au barrage en cas de prise de charge et baisse de charge successives avec les temps de manœuvres originaux.



**Figure 15.** Résultats de simulation pour l'évolution du débit au pied du puits blindé et à la prise d'eau au barrage en cas de prise de charge et baisse de charge successives en phase avec la cheminée d'équilibre avec les temps de manœuvres modifiés.



**Figure 14.** Résultats de simulation pour l'évolution de la pression en galerie et du niveau d'eau dans la cheminée d'équilibre en cas de prise de charge et baisse de charge successives avec les temps de manœuvres originaux.



**Figure 16.** Résultats de simulation pour l'évolution de la pression en galerie et du niveau d'eau dans la cheminée d'équilibre en cas de prise de charge et baisse de charge successives en phase avec la cheminée d'équilibre avec les temps de manœuvres modifiés.

obtenu lors de la première prise de charge vaut  $65.7 \text{ m}^3/\text{s}$  alors que le débit au pied du puits est de  $55 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette différence est accentuée lors de l'enchaînement de la baisse de charge avec la reprise de charge où le débit au barrage atteint même  $72.2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ce débit important qui est de 31% supérieur au débit d'équipement de l'aménagement est susceptible d'activer la palette de survitesse située à la vanne de prise du barrage et de provoquer un arrêt d'urgence de tout l'aménagement. Un incident similaire s'était produit lors d'un enchaînement de baisse de charge suivi d'une reprise de charge et avait conduit à une indisponibilité de tout l'aménagement [19]. Une approche possible pour se prémunir de ce type de désagrément est de simuler des prises et des baisses de charge successives en phase avec la cheminée d'équilibre. Ce cas, bien que peu probable, permet de définir les temps de manœuvre qui sont compatibles avec les valeurs extrêmes de niveau d'eau dans la cheminée d'équilibre, de pression en galerie d'amenée, et de débit au barrage. Ce cas est illustré en Figure 15 et Figure 16 pour la situation après modification des temps de manœuvres qui montre qu'il

n'y a plus d'amplification des oscillations de masses et que les valeurs de débit au barrage restent proches de celles au pied du puits blindé.

## 5. Mise en œuvre

Les nouveaux temps de manœuvres définis dans le cadre de l'étude des transitoires hydrauliques réalisée durant la réhabilitation des groupes ont été implémentés sur site afin d'éliminer les risques de surpression et de réduire l'amplitude des débits obtenus à la prise d'eau du barrage. Ces modifications ont pu être réalisées en maintenant la qualification Swissgrid pour le réglage primaire et le réglage secondaire.

## 6. Conclusions et recommandations

Les aménagements hydroélectriques contribuent de manière importante à la stabilité des réseaux électriques grâce à une grande flexibilité d'exploitation, et permettent ainsi une meilleure intégration des nouvelles énergies renouvelables. La modernisation des équipements permet d'améliorer encore cette flexibilité mais peut également induire des cas

de charge de transitoires hydrauliques qui restaient très peu probables par le passé. L'étude du cas de l'aménagement de 340 MW Electra-Massa a permis d'illustrer cette problématique où des risques de surpression et des problèmes de surdébits à la prise d'eau du barrage ont pu être résolu par la modification des temps de manœuvres des turbines Pelton, tout en préservant des services systèmes compatibles avec les exigences du gestionnaire de réseau Swissgrid. Chaque aménagement hydraulique étant différent et ayant son propre historique, il est difficile de généraliser les conclusions obtenues ici, mais ce cas d'étude souligne l'importance de procéder à des études de transitoires hydrauliques détaillées en cas de modernisation ou de modification des aménagements afin d'en garantir la sécurité. Ce type de modélisation numérique permet également d'évaluer le potentiel hydraulique d'un aménagement afin de procéder à une éventuelle augmentation de puissance.

### Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la société Electra-Massa AG, pour l'opportunité donnée

de publier ces résultats, ainsi que la société Hydro Exploitation SA pour la réalisation des mesures sur site.

## Références

- [1] U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook(IEO)2013, DOE/EIA-0484 (2013), July 2013. [http://205.254.135.7/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://205.254.135.7/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf)
- [2] Martins, N., et al., The integration of large amounts of renewable energy in the Portuguese Power System, SHF: «Pumped storage Powerplants», Lyon, nov. 2011.
- [3] Sousa, J. C., Mendes, V. T., New challenges for hydro pumped stroages taking into account renewable energy in electricity markets and ancillary services, Proceedings of HYDRO 2012, October 29–31, 2012, in Bilbao, Spain, Paper 09c.02.
- [4] Fisher, R. K., et al., A Comparison of Advanced Pumped Storage Equipment Drivers in the US and Europe, Louisville, USA, Hydrovision 2012.
- [5] Swissgrid, Transmission Code 2013, TC 2013 Version décembre 2013, V01.
- [6] ENTSO-E, European Network of Transmssion System Operators for Electricity, Implementation guideline for network code, «Requirements for grid connection applicable to all generators», 16 October 2013.
- [7] Nicolet, C., Kawkabani, B., Drommi, J.-L., Singainy, T., Grillot, P., Assessment of Hydro Unit Grid Code Compliance by Means of Numerical Simulations, Proceedings of HYDRO 2014, October 13–15, 2014, in Cernobbio, Italy, Paper 13b.03.
- [8] Nicolet, C., Beguin, A., Kawkabani, B., Pannatier, Y., Schwery, A., Avellan, F., Variable Speed and Ternary Units to Mitigate Wind and Solar Intermittent Production, Proceedings of Hydrovision Conference 2014, July 22–25, 2014, Nashville, TN, USA, Session: Session 4H: Hydropower Systems and Flexibility.
- [9] Sick, M., Oram, C., Braun, O., Nennemann, B., Coutu, A., Hydro projects delivering regulating power: Technical challenges and cost of operation, Proceedings of HYDRO 2012, October 29–31, 2012, in Bilbao, Spain, Paper 11.03.
- [10] Nicolet, C., Berthod, R., Ruchonnet, N., Avellan, F., Evaluation of Possible Penstock Fatigue Resulting from Secondary Control for the Grid, Proceedings of HYDRO 2010, September 27–29, 2010, in Lisbon, Portugal, Paper 10.3.
- [11] Bergant, A., Karney, B., Pejovic, S., Mazij, J., Treatise on water hammer in hydropower standards and guidelines, Proceedings of the 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Montréal, Canada, September 22–25, 2014, paper 2.3.2.
- [12] Sapin, A., Logiciel modulaire pour la simulation et l'étude des systèmes d'entraînement et des réseaux électriques, Thesis EPFL n° 1346, 1995, Switzerland, Lausanne (<http://library.epfl.ch/theses/?nr=1346>).
- [13] Nicolet, C., Hydroacoustic modeling and numerical simulation of unsteady operation of hydroelectric systems, Thesis EPFL n° 3751, 2007, Switzerland, Lausanne (<http://library.epfl.ch/theses/?nr=3751>).
- [14] Alligné, S., Forced and self oscillations of hydraulic Systems induced by cavitation vortex rope of Francis turbines, Thesis EPFL n° 5117, 2011, Switzerland, Lausanne (<http://library.epfl.ch/theses/?nr=5117>).
- [15] Hager, W., Swiss contribution to water hammer theory, Journal of Hydraulic Research, Vol. 39, 2001, No1, pp.: 3–10.
- [16] Li, T. T., Lai, X., Liu, W. B., Li, X. M., Influence of initial nozzle opening on the maximum pressure head at the impulse turbine inlet and set of needle closing law, Proceedings of the 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Montréal, Canada, September 22–25, 2014, paper 1.1.1.
- [17] Nicolet, C., Vulliod, G., Weiss, E., Bochereens, E., Dayer, J.-D., Chène, O., Transient analysis of Cleuson-Dixence power plant and injector closure in the reflection time, Proceedings of 11th International Conference on Pressure Surges, October 24–26, 2012, Lisbon, Portugal, pp. 27–41.
- [18] Mosonyi, E., Seth, H. B. S., The surge tank-a device for controlling water hammer, Journal of Water Power & Dam construction, February 1975, Part I pp.: 69–74 and Part II pp.:119–123.
- [19] Vuignier, E., Nicolet, C., «Détermination des transitoires hydrauliques au moyen de la simulation numérique», 3e journée d'étude Hydrouisse: Construction, exploitation et entretien des centrales hydroélectriques, SWV, Association suisse pour l'aménagement des eaux, Olten, 19 octobre 2014, <http://www.swv.ch/Tagung-Wasserwirtschaft-2014> (Version en français et en allemand).

## Adresse des Auteurs

- Dr. Christophe Nicolet, Power Vision Engineering Sàrl, Chemin des Champs-Courbes 1 CH-1024 Ecublens  
[christophe.nicolet@powervision-eng.ch](mailto:christophe.nicolet@powervision-eng.ch)
- M. Eric Vuignier, ALPIQ Suisse SA, Rue des Creusets 41, CH-1951 Sion  
[eric.vuignier@alpiq.com](mailto:eric.vuignier@alpiq.com)