

## L'INNOVATION DANS LE DOMAINE DE L'HYDRAULIQUE

Maryse FRANCOIS – Farid MAZZOUJI  
ALSTOM Power Hydro (Grenoble, France)

### RESUME

*Depuis plus de cent ans, l'évolution de l'énergie hydraulique et les moyens de la produire est incessante. La taille des machines et leurs performances ont évolué. Leurs genres se sont aussi diversifiés en fonction de leur utilisation de plus en plus spécifique. Les contraintes liées à l'environnement et les exigences du marché ont nécessité l'inventivité des ingénieurs et des décideurs afin d'adapter les conceptions et les exploitations aux normes modernes.*

*Nous résumons dans cet article quelques innovations dans les concepts et dans les moyens, qui ont permis cette évolution. L'aménagement des plus grosses centrales, contraintes liées aux problèmes de la réhabilitation et les moyens mis en œuvre pour les résoudre sont illustrés. Quelques exemples d'innovations liées à l'environnement sont présentés, notamment les concepts de turbines « fish friendly », d'oxygénation de l'eau et de turbines sans huile.*

*Une illustration est aussi donnée des moyens novateurs mis en œuvre dans la conception et la réalisation des turbines. L'importance des codes de calcul CFD et FEM est soulignée et un accent particulier est mis sur les méthodes de génération et d'optimisation des aubages.*

*Enfin, deux produits particulièrement novateurs sont exposés : la turbine Pelton à flasques et MINI-AQUA spécialement adapté à la mini-hydro.*

### ABSTRACT

*The evolution of the hydraulic energy and the means to produce it is being permanent for more than 100 years. The turbines dimensions and their performances evolved. Their type also evolved answering to a more and more specific needs. The environment constrain and the market necessity leads engineers and decision markers to every day reinvent new concepts to adapt design and exploitation to modern standards.*

*We summarise in this paper some of the innovations in means and concepts that allow this evolution.*

*The laying out of the large turbines, the requirements linked to the refurbishment problems and the means to solve them are presented. Some of the innovations linked to the environment problems are presented, notably the concepts of the fish friendly turbines, Dissolved oxygen enhancement and the greaseless turbines.*

*An illustration is also given of the new means and methods in the turbine conception and realisation. The importance of CFD and FEM codes is underlined, and a specific presentation is made about blades optimisation and generation.*

*At last two innovative products are presented: the hooped pelton and the MINI-AQUA especially adapted to mini-Hydro*

### I. INTRODUCTION

Les hommes ont su dès l'antiquité utiliser la force de l'eau. C'est au XIX<sup>e</sup> siècle que les machines hydrauliques se sont développées. Etant à Grenoble, on ne peut pas ne pas citer Aristide Bergès. Il a aménagé à Lancey en 1869 la première chute de 200 m, la puissance disponible était de 100 CV.

L'exposition universelle de 1889 consacre une place importante à la « houille blanche ». Un formidable engouement est né pour cette nouvelle forme d'énergie : propre et renouvelable.

Depuis, les développements autour de cette technologie n'ont pas cessé. La gamme d'utilisation et la taille des équipements n'ont cessé d'augmenter : des chutes allant jusqu'à 1200 m peuvent aujourd'hui être équipées, toute la gamme des puissances est utilisée en fonction des sites à équiper depuis les plus petites installations jusqu'à des machines de plus de 800 MW.



**Ancienne roue de moulin du XIX<sup>e</sup> siècle, ancêtre des turbines actuelles**

Le XX<sup>e</sup> siècle a aussi vu une évolution importante en terme de nouveaux types de turbines avec en particulier les turbines pompes, en parallèle à l'exploitation de l'énergie nucléaire.

L'amélioration des outils de *design* a permis d'augmenter les performances et les puissances, tout en montrant l'intérêt des réhabilitations de machines anciennes.

Le respect de l'environnement a conduit plus récemment au développement de turbines dites « *fish friendly* ».

Aujourd'hui encore, d'autres types de turbines sont développés.

Nous célébrons le 100<sup>e</sup> anniversaire du premier Congrès sur la « houille blanche ». L'énergie hydraulique est aujourd'hui la plus importante source d'énergie renouvelable, elle représente 20 % de la production mondiale d'électricité. L'innovation constante est nécessaire pour permettre à l'énergie hydraulique de prendre sa place dans le cadre du développement durable.

## II. TOUJOURS PLUS

La taille des machines n'a cessé d'évoluer. Après les grands projets du Brésil comme ITAIPU ou TUCURUI, on est aujourd'hui en train de construire l'aménagement des TROIS GORGES dont les objectifs sont multiples : gestion des crues, navigation et production d'énergie.

### II.1 Le projet des Trois Gorges

#### L'AMENAGEMENT HYDRAULIQUE DES TROIS GORGES

L'idée de créer une retenue sur le cours du Yang-Tseu est ancienne ; elle est pour la première fois évoquée par Sun-Yat Sen en 1919. Après de nombreuses années d'expertises et de discussions, la décision politique de construire le projet des Trois Gorges est finalement entérinée le 3 avril 1992 par un vote de l'Assemblée Nationale Populaire chinoise. Les bénéfices attendus concernent principalement la régulation du cours du Yang-Tseu, la production d'énergie et l'extension de la navigabilité du fleuve.

Le barrage est situé au centre du pays à environ 1 000 km des villes de Pékin, Tianjin, Shanghai et Canton. L'ouvrage retiendra les eaux drainées tout au long des 4 500 km du cours supérieur du Yang-Tseu sur un bassin de plus d'un million de km<sup>2</sup> avec un débit annuel moyen de 450 milliards de m<sup>3</sup>.

En rive gauche un canal permettra à des chalands de 10 000 t de franchir la dénivellation de 113 m en cinq degrés d'écluses. Il sera flanqué d'un ascenseur à bateaux de 3 000 t de capacité. Un trafic fluvial annuel de 50 millions de tonnes pourra alors remonter le fleuve jusqu'à la ville industrielle de Chongqing à 600 km en amont du barrage.

L'aménagement hydroélectrique actuellement planifié comprend 26 groupes de puissance nominale unitaire 710 MW, soit une puissance totale installée supérieure à 18 000 MW. Les machines devront fonctionner sous une chute allant de 61 m (à la mise en eau du barrage) jusqu'à la chute maximale de 113 m. La puissance unitaire maximum est de 852 MW.

Le contrat signé le 2 septembre 1997 entre « Three Gorges International Tendering Company Ltd » (le client), « China Yangtze Three Gorges Project development Corporation » (le maître d'œuvre), et le consortium ALSTOM Power Hydro (France) / ALSTOM Power Energia SA (Brésil) prévoit la fourniture des équipements mécaniques de 8 des 14 turbines de la première tranche.



**Le site futur du barrage**

Le 8 novembre 1997 les eaux du Yang-Tseu étaient déviées par le canal de dérivation provisoire. Les travaux de l'usine rive gauche pouvaient commencer. En février 1998, soit moins de six mois après la signature du contrat, ont été livrées les premières pièces scellées des groupes (blindages des nez de pile). La mise en service de la première turbine est programmée en 2003, et les 14 unités de la première tranche doivent être opérationnelles en 2006.

## II.2 La réhabilitation

L'évolution des besoins des clients : modifications des caractéristiques des aménagements, augmentation de la puissance, amélioration des performances hydrauliques, diminution des coûts de maintenance avec notamment des améliorations de cavitation ou de niveau de fluctuations ; ainsi que les progrès réalisés dans les tracés hydrauliques rendent souvent intéressants la réhabilitation des anciennes centrales.

L'objectif majeur de la réhabilitation est en général de maximiser le retour sur investissement et les contraintes sont en général les suivantes : pas ou peu de modification du génie civil et un délai d'intervention faible.

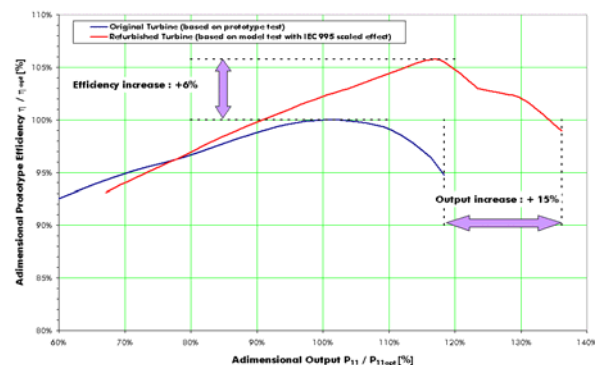
Afin de répondre à ce défi, la première étape consiste à faire une analyse des machines existantes, en particulier des parties fixes ; une vérification adaptée de la géométrie peut être envisagée en fonction de la qualité des plans existants et de leur degré de fiabilité.

L'analyse est basée dans un premier temps sur une approche mono dimensionnelle puis sur des calculs plus sophistiqués. Les possibilités des plus récents codes de CFD sont utiles pour avoir la précision nécessaire. Ils sont une aide précieuse et indispensable mais ne peuvent en aucun cas se substituer à l'expérience qu'ont les professionnels des modèles et des prototypes.

A titre d'exemple, citons le cas de « CHUTE A LA SAVANE » ( 5 turbines de 51,6 MW sous 33,8 m de chute, diamètre de la roue 4,5 m). Pour ce projet, les directrices ont été changées.

Le gain espéré de ce changement à partir des résultats de calcul a été confirmé par la comparaison sur essai modèle avec une amélioration de 0,7 % en terme de rendement. Pour la roue, on cherche à augmenter la puissance et à améliorer les rendements en restant en dehors du domaine de cavitation. La roue est validée par des calculs CFD. Elle est aussi calculée mécaniquement, puis essayée sur modèle.

Dans le cas de CHUTE A LA SAVANE, le changement de la roue et des directrices conduit à une amélioration de rendement est de 6 % et une augmentation de puissance de 15 %.



**Comparaison des performances entre l'existant et la réhabilitation ( CHUTE A LA SAVANE )**

La partie la plus difficile à analyser par calcul reste l'aspirateur. Les modifications sont souvent difficiles et coûteuses, l'expérience est dans ce cas le complément indispensable aux analyses des calculs. On peut cependant citer certains cas où la modification de l'aspirateur est intéressante. Prenons l'exemple de la réhabilitation des trois Kaplan de KEGUMS en Lettonie sur la rivière Daugava. La modification de l'aspirateur associée à la modernisation de la roue dans cette réhabilitation a permis de passer d'une puissance de 14 MW à une puissance de 17,5 MW sous 13,5 m de chute.



**Roue KEGUMS**

## II.3 Les turbines pompes

L'utilisation des turbines pompes est une façon de réguler les besoins en énergie. Les premiers grands développements de ce type de machine sont liés au développement du nucléaire. Ces machines permettent de pomper pendant les heures creuses et de restituer l'énergie pendant les heures pleines, avec un rendement supérieur à 80 %.

Citons juste comme exemple le développement des machines de très hautes chutes à deux étages réglables tel que le projet de Yang Yang en Corée : 4 turbines pompes de 250 MW sous 800 m de chute.

## III. L'INNOVATION DES METHODES

Voici encore quelques 15 ou 20 ans, la conception d'une turbine hydraulique se faisait sur la planche à dessin avec l'aide de pistolets. Les calculs d'écoulements se résumaient dans le meilleur des cas à des calculs fluides parfaits bidimensionnels, et les calculs de résistance des matériaux servaient au dimensionnement mécanique des différentiels composants.

La conception était alors un processus long et complexe, et la finalisation du design se faisait principalement sur plate forme d'essai sur des modèles réduits qu'on modifiait plusieurs fois avant d'atteindre les caractéristiques souhaitées, notamment en terme de colline de rendement, de cavitation et de puissance.

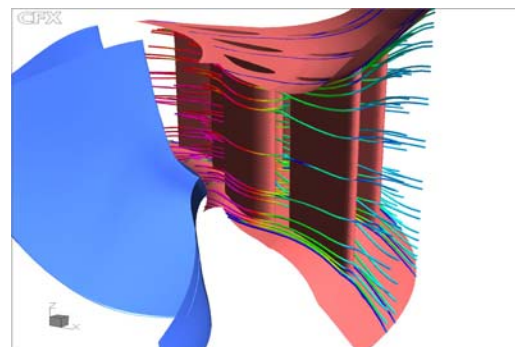
Cette méthodologie semble aujourd'hui obsolète. En effet, le temps de mise en œuvre qu'elle nécessite est beaucoup plus long qu'un client, même très généreux, pourrait accorder à un constructeur aujourd'hui.

Aussi, les constructeurs ont du évoluer !!

Et c'est principalement avec l'introduction des ordinateurs dans le processus que les progrès les plus marquants de ces dernières années ont été effectués :

### III.1 Calculs d'écoulements (CFD)

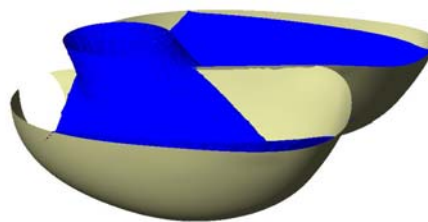
Les calculs fluides parfaits et Naviers-Stokes sont aujourd'hui massivement utilisés dans le dimensionnement hydraulique des composants des turbines. Ces calculs permettent une analyse fine des phénomènes complexes en jeu. On peut en effet aujourd'hui calculer précisément les décollements de couches limites, les dépressions et les pertes de charge dans une machine complète, en plusieurs points de fonctionnement. Ceci permet d'explorer par le calcul une grande partie de la phénoménologie inaccessible à l'expérience, et ainsi élargir les zones de fonctionnement et améliorer les performances.



**Calcul Navier-Stokes  
d'une double grille lignes de courants**

Citons comme exemple le projet de Outardes 3 (4 machines de 260 MW sous 144 m) dont les essais modèles dernièrement réalisés ont confirmé les prédictions du calcul. En effet, pour cette réhabilitation le point de puissance et le point optimum de la colline ne sont distants que de 3 % en terme de rendement.

Pour les turbines Pelton, des efforts sont déployés actuellement afin de calculer les écoulements à surface libre en stationnaire et instationnaire de façon à déterminer les paramètres de design.

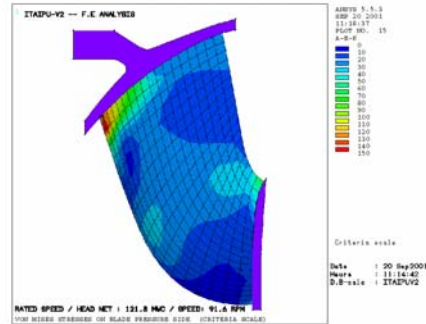
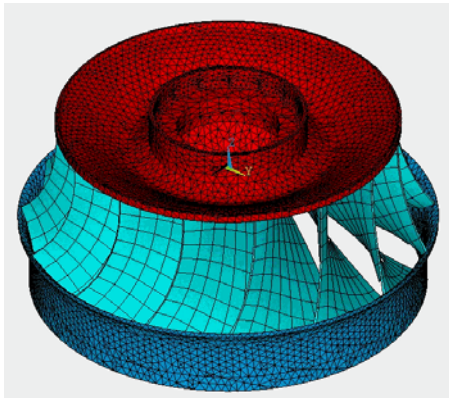


**Calcul Navier Stokes d'un auget Pelton**

### III.2 Calculs mécaniques

De la même façon que pour les calculs fluides, les calculs éléments finis sont de nos jours courants dans le dimensionnement mécanique des turbines hydrauliques.

En relation avec le design hydraulique et la CAO, ALSTOM a par exemple développé avec Ansys un outil de calcul qui permet, à partir des champs de pressions issues de la CFD de calculer les déplacements, les contraintes globales et les fréquences propres de façon à pouvoir optimiser le design mécanique des roues.



**Maillage et calcul éléments finis d'une roue Francis**

Par ailleurs, l'évolution des développements permet d'approcher de mieux en mieux les phénomènes dynamiques.

### III.3 Programmes de génération et optimiseurs

L'optimisation du design d'une roue est équivalente à l'optimisation d'un jeu de paramètres de tracé vis-à-vis de certains critères de fonctionnement. En effet, pour un projet donné, un très petit nombre de tracé peut satisfaire des conditions de fonctionnement souvent très étendues et exigeantes en terme de performance ou de cavitation.

Plusieurs méthodes sont employées actuellement pour concevoir les aubes des machines hydrauliques.

La méthode directe est la plus ancienne : avec un programme de génération d'aubage, l'ingénieur choisit une forme (un jeu de paramètres géométriques), la calcule et la modifie jusqu'à l'obtention du résultat escompté. Les programmes de calcul CFD et de prédiction des performances lui permettent d'orienter ses modifications. Cette méthode est en fait un processus itératif. L'estimateur d'erreur et le générateur de paramètres sont la même personne : l'ingénieur.

La méthode inverse a vu le jour avec le développement des programmes de calculs. L'ingénieur choisit le jeu de paramètres hydrodynamiques auquel il souhaite arriver, et le programme inverse lui fournit une forme géométrique. Souvent cette forme n'est rien d'autre que le résultat du calcul sous forme de lignes de courant. Cette méthode s'appuie sur des approximations de type fluide parfait et peut se révéler très efficace si la plage de fonctionnement est réduite.

L'optimisation automatique commence à voir le jour. Les programmes de génération de tracé et les programmes d'évaluation des performances sont couplés grâce à des programmes d'optimisation. Ceux-ci peuvent être d'optimisation locale ou globale. ALSTOM a développé un outil qui permet les deux approches. C'est néanmoins l'approche globale qui est la plus la faveur des experts. Elle permet en effet d'explorer un très grand nombre de jeu de paramètres grâce aux algorithmes évolutionnaires (ou algorithmes génétiques). Pour 40 variables environ  $40^{60}$  roues peuvent être explorées.

Une optimisation numérique grâce à des méthodes de parallélisation et d'accélération de la convergence permettent des temps de réponse de plus en plus courts.

#### IV. L'INNOVATION LIEE A L'ENVIRONNEMENT

L'énergie hydraulique est une énergie propre. Elle peut cependant avoir quelques inconvénients du point de vue de l'environnement :

- La « cohabitation » avec les poissons
- Le manque d'oxygénation des rivières lié à la stagnation dans les barrages
- Le risque lié à la présence d'huile nécessaire au fonctionnement des turbines

Pour l'ensemble de ces problèmes, les récents développements de R&D ont permis de trouver des solutions.

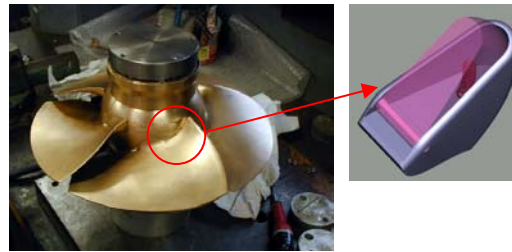
##### IV.1 La cohabitation avec les poissons

Des études importantes ont été conduites surtout aux Etats-Unis sur les causes principales de mortalité des poissons lorsqu'ils passent à travers les turbines de basses chutes, en particulier dans le cas des jeunes saumons qui descendent les rivières. Les principales causes identifiées sont les chocs, les jeux et une trop rapide évolution de pression.

ALSTOM mène depuis plusieurs années une campagne de recherche sur des designs de turbine Kaplan qui permettent de satisfaire les critères définis par les biologistes et de garantir des turbines « fish friendly ».

Le premier critère consiste à limiter les possibilités d'impacts en réduisant le nombre de pales.

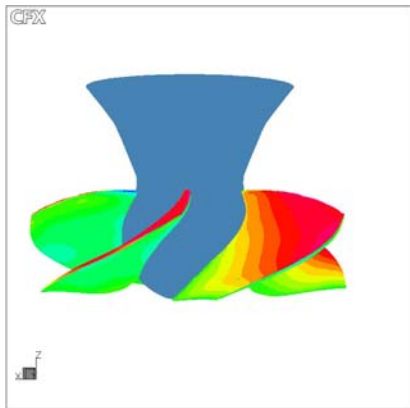
Le deuxième critère consiste à limiter le jeu entre les aubes et le moyeu. Le tracé de la roue prend donc en compte un moyeu spécifique associé à un système de volet, ainsi qu'une ceinture sphérique.



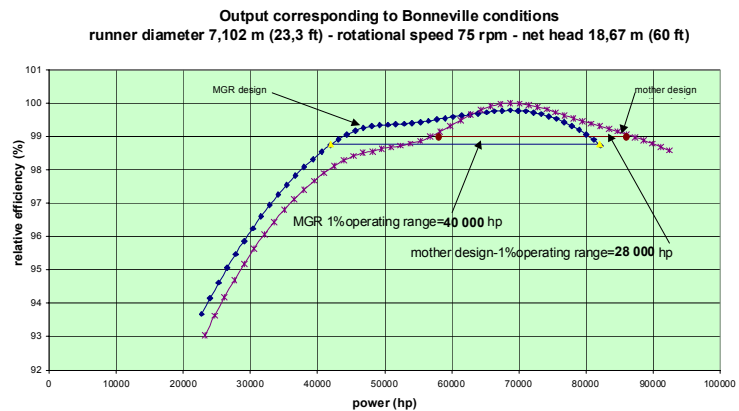
Modèle physique

Le troisième critère concerne les caractéristiques propres du tracé .

L'objectif est de faire un tracé dont l'évolution des pressions entre l'entrée et la sortie est aussi régulière que possible dans une zone de fonctionnement aussi large que possible.



Pression sur aube MGR à B.E.P



Comparaison des zones d'utilisation d'une Kaplan standard et de la roue MGR

Les fonctionnements en dehors de l'optimum conduisent à des écoulements plus perturbés et donc moins favorables aux poissons ; certaines machines ne sont donc utilisées que dans la zone dont le rendement compris entre le rendement maximum et le rendement maximum moins 1 %.

La figure montre la comparaison en terme de possibilité d'utilisation d'une turbine classique et de la dernière turbine ALSTOM MGR dans le cas test de Bonneville. La zone d'utilisation augmente de 42 % avec la nouvelle roue MGR.

## IV.2 L'oxygénation

Si la stagnation de l'eau dans les barrages peut conduire à un manque d'oxygénation de l'eau, néfaste à la survie du milieu aquatique, il existe aujourd'hui des méthodes qui permettent de réinjecter de l'air dans l'eau au niveau des turbines. Ces injections peuvent se faire dans différentes zones de la turbine en fonction des caractéristiques de chaque machine.

## IV.3 Pollution d'huile

Même si la quantité d'huile utilisée pour faire fonctionner les machines hydrauliques (lubrifications des paliers, servomoteur...) reste faible et si le risque de fuite dans la rivière est encore plus faible, la meilleure façon de limiter ce risque est de supprimer complètement l'utilisation d'huile.

Des développements récents ont montré cette possibilité. On peut citer les trois turbines pompes DERIAZ « sans huile » de Naussac dans le massif central : le palier est hydrostatique, les pales, le vannage sont manœuvrés à l'aide d'un système à eau. Le distributeur est contrôlé par un système électrique. Tout fluide polluant a été éliminé de ces machines.

Grâce à la recherche et à l'innovation, l'énergie hydraulique « verte » par excellence est aujourd'hui capable de répondre aux critères de plus en plus exigeants de l'environnement.

## V. ENCORE DES NOUVEAUX PRODUITS

### V.1 Les Peltons à flasques

Ces roues constituent des alternatives aux roues Pelton classiques en acier moulé.

Jusqu'à là, la plupart des roues Pelton étaient moulées en une seule pièce. Mais l'augmentation des performances et des charges d'une part, la difficulté de contrôler la qualité du moulé dans les zones les plus critiques, et les aléas du marché des moulés ont conduit au développement des roues forgées ou soudées.

L'idée originale de la Pelton à flasques consiste à séparer les fonctions hydrauliques et mécaniques. Les augets assurent la fonction hydraulique et les deux flasques latéraux la fonction mécanique.



**Le nouveau design de la Pelton à flasques**

Le tracé spécifique des augets et l'adaptation des flasques permettent d'assurer avec cette nouvelle conception des performances hydrauliques aussi bonnes que dans le cas d'une roue classique.

Les avantages en terme de fabrication sont clairs :

Les augets sont fabriqués séparément. La qualité de fabrication de ce type de pièce moulée est ainsi bien meilleure et le contrôle beaucoup plus facile. Les augets sont ensuite complètement usinés en commande numérique ce qui assure une parfaite reproductibilité des surfaces hydrauliques.

Les flasques sont obtenus à partir de galettes forgées, elles sont aussi usinées en commande numérique.

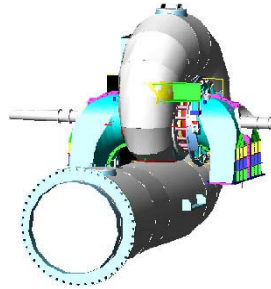
Ce concept assure la possibilité de changer les augets au lieu de la roue complète. Et c'est apprécié des clients.

Un autre avantage important concerne la quasi-absence de vibration liée aux impacts du jet.

Une première machine de ce type a été installée avec succès et à la satisfaction d'EDF en 2001 à Beaufort en Savoie : il s'agit d'une turbine de 4.3 MW sous 282 m sur la rivière Doron.

## VI.2 Mini-Aqua

Nouvelle technologie et nouveau concept, le produit Mini-Aqua développé par ALSTOM dans les dernières années est particulièrement adapté à l'aménagement de la petite hydraulique : produit standard et fiable, mise en service rapide, coût adapté ont été les points forts de ce développement aujourd'hui opérationnel.



Francis Mini-Aqua

## V. CONCLUSION

L'énergie hydraulique est aujourd'hui bien connue. Mais que d'évolutions depuis les premières machines : évolution en terme de taille de machine, de performance, de meilleure adaptation au site, évolution en terme de réduction des temps de cycle, de maintenance, évolution en terme de prise en compte complète de l'environnement.

L'innovation qui n'a pas cessé devrait permettre à l'énergie hydraulique d'apporter sa contribution au problème énergétique auquel nous faisons face aujourd'hui dans le cadre du développement durable.

### Références

#### ***Three Gorges Project - The Hydraulic Turbines***

J. BREMOND, G. VUILLEROD, Centre de Technologie, ALSTOM Power Hydro, Grenoble, France  
A SHF 1998, Chambéry, France

#### ***Hydraulic machinery and cavitation, design and analysis of two stage pump turbine***

Par F. MAZZOUJI , M. FRANCOIS , F. HEBRARD , JB. HOUELINE , D. BAZIN, Centre de Technologie, ALSTOM Power Hydro, Grenoble, France  
A IARH Symposium, Valence, Espagne

#### ***Model result on a new Fish Friendly Kaplan turbine***

Par P. VINH, P. MORA et L.TOMAS, Centre de Technologie, ALSTOM Power Hydro, Grenoble, France,  
J. KIREJCZYK, Alstom Power Hydro Canada  
A HYDROVISION 2002 Portland USA.

#### ***Deriaz pump-turbine for the NAUSSAC 2 plant in France***

Par JB. HOUELINE, JM.VERZEROLI, ALSTOM Power Hydro, Grenoble France,  
J. CLERIN, SOMIVAL, Clermont-Ferrand, France  
A HYDROPOWER & DAMS 1999, Autriche

#### ***Validation d'une méthode Volume Of Fluid (VOF) par simulation numérique d'impact de jet***

Par P. LEROY, Centre de Technologie, ALSTOM Power Hydro, Grenoble, France,  
T. MAITRE, B. ZOPPE, C. PELLONE, Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et industriels, Grenoble, France  
Au Journal of fluid engineering, 2001

#### ***First Industrial Prototype of Hooped Pelton runner***

Par G. VUILLEROD et PY. LOWYS, Centre de Technologie, ALSTOM Power Hydro, Grenoble, France,  
P. CLAVEIROLE et JP. CHARMET, EDF, Grenoble, France  
A WATERPOWER 2001, Prague

#### ***Methods for air admission in hydroturbines***

B. PAPIILLON, M. SABOURIN, Alstom Canada Inc., Sorel-Tracy, Canada  
M.COUSTON, Centre de Technologie, Alstom Power Hydro, Grenoble, France  
Grenoble, France  
Claire DESCHÉNES, LAMH, Laval University, Quebec, Canada  
A 21th IARH Symposium 2002, Lausanne, Suisse

### Auteurs :

Maryse FRANCOIS, Directeur du Centre de Technologie Turbine,  
ALSTOM Power Hydro, 82 avenue Léon Blum – BP75 38041 Grenoble Cedex 09 – [maryse.francois@power.alstom.com](mailto:maryse.francois@power.alstom.com)  
Farid MAZZOUJI, Responsable calcul numérique, Centre de Technologie Turbine,  
ALSTOM Power Hydro, 82 avenue Léon Blum – BP 75 38041 Grenoble Cedex 09 – [farid.mazzouji@power.alstom.com](mailto:farid.mazzouji@power.alstom.com)