

# Développement systématique et outils CAO pour la petite hydraulique

## *Systemisation and CAD tools for small hydro*

Vincent DENIS

MHyLab

Laboratoire de Mini-Hydraulique<sup>1</sup>

### Résumé

*La démarche actuelle, dans le domaine des turbines d'une puissance maximale de l'ordre de 1 MW, consiste généralement à développer des gammes standard ou à réaliser des modèles réduits de grandes turbines en adaptant et simplifiant le tracé, sans en mesurer les conséquences. Le résultat de cette démarche est que l'on ne fournit pratiquement jamais une machine optimale d'un point de vue hydraulique. Les conséquences peuvent être multiples et on peut constater que bon nombre de petites turbines, actuellement proposées sur le marché, ne répondent pas simultanément aux critères de **simplicité, performances garanties élevées et fiabilité**. Il est dès lors essentiel de développer un concept de petits aménagements satisfaisant à ces trois critères et permettant d'**abandonner la construction d'équipements standard au profit d'une conception systématique**, de manière à proposer une installation garantie et parfaitement adaptée aux caractéristiques du site, pour un coût compatible avec les impératifs de la branche.*

### Abstract

*At the time being, the method used in the field of small turbines with an output of more or less 1MW, consists either in designing a set of standard turbines, or in creating reduced scale models of large turbines, then adapting and simplifying the profiles without measuring the consequences. The result is that practically no machine built this way is optimal from a hydraulics viewpoint. There are many possible consequences and it can be said that numerous small turbines, now on the market, do not allow criteria of **simplicity, high and guaranteed performance, and reliability** to be met simultaneously. It is then essential to develop a concept pertaining to small plants, which will satisfy these three essential criteria and which will allow to **abandon** the construction of **standard equipment** in favour of **systemized design**, allowing the installation to be **guaranteed** as perfectly **adapted** to the site's characteristics, at a construction **cost** compatible with the imperatives of the branch.*

## 1 INTRODUCTION

On distingue trois catégories principales d'acteurs du marché de l'hydraulique qui sont les constructeurs de grandes machines, les instituts universitaires ou indépendants et les constructeurs de petites turbines. Si les deux premières catégories réalisent de nombreux essais en laboratoire pour faire progresser la technique des machines hydrauliques, développer de nouveaux moyens de calcul et conception ou pour améliorer la connaissance des phénomènes hydrodynamiques, ce n'est pas le cas des constructeurs indépendants de petites turbines (ne dépendant pas de grands groupes industriels incluant des sociétés développant des grandes turbines) qui ne peuvent en assumer le financement. De fait, ces méthodes ne sont applicables que pour les grandes machines, développées à l'unité en fonction des caractéristiques du site.

Actuellement, la démarche suivie dans le domaine des turbines d'une puissance maximale de l'ordre d'un MW consiste soit à développer des gammes standard, qu'il est possible d'adapter plus ou moins bien au site à équiper, soit de réaliser des modèles réduits de grandes turbines en adaptant et simplifiant le tracé, sans en mesurer les conséquences. Le résultat est que l'on ne fournit pratiquement

---

<sup>1</sup> MHyLab, Laboratoire de Mini-Hydraulique, CH-1354 Montcherand – Suisse – [denisv@mhyllab.com](mailto:denisv@mhyllab.com),  
Tél : + 41 24 442 86 20, Fax : + 41 24 441 36 54

jamais une machine optimale d'un point de vue hydraulique. Les conséquences peuvent être multiples, comme par exemple la non tenue (à débit et chute égaux) des garanties de performance, impliquant une perte de production, la surcharge des turbines travaillant en sur-ouverture pour atteindre la puissance garantie, la cavitation, etc., problèmes préjudiciables aussi bien au rendement énergétique qu'à la durée de vie des matériels.

Ces problèmes sont dommageables aussi bien au constructeur de la turbine, qui doit s'acquitter des pénalités et qui voit sa crédibilité sur le marché diminuer, qu'à l'exploitant de la centrale, qui n'obtiendra pas la production escomptée et sera contraint de travailler avec une machine non fiable.

En résumé, il est possible de dire que les petites turbines, dont la puissance maximale est de l'ordre du MW, actuellement proposées sur le marché, ne permettent pas de répondre simultanément aux critères fondamentaux de **simplicité, performance élevées et garanties, fiabilité**.

Cet article décrit comment il est possible d'**abandonner la construction d'équipements standard au profit d'une conception systématique**, permettant de proposer une installation garantie et parfaitement adaptée aux caractéristiques du site, ceci pour des coûts de construction et d'exploitation compatible avec les impératifs économiques de la branche.

## **2 DEFINITION DES PRINCIPES DE STANDARDISATION & DE SYSTEMATISATION**

Le développement d'une gamme de produits standard, visant à répondre aussi bien que possible à toute demande dans le domaine, est dicté par la faible marge bénéficiaire réalisable, rendant difficile, voire impossible, tout développement particulier, les frais engendrés par les travaux en laboratoire ne pouvant en aucun cas être amortis, ceci d'autant plus que nombre d'entreprises livrant de petites turbines sont de taille réduite.

De manière à éviter toute confusion ultérieure, il est important de rappeler que la démarche de standardisation consiste à découper le domaine d'application d'un type de turbines (dont les limites sont données par un débit et une chute maximums) en plusieurs sous-domaines, à développer un nombre limité de machines, calculées en un point précis de chaque sous-domaine, puis de les adapter avec plus ou moins de bonheur aux différents sites à équiper, sans connaître l'effet de ces adaptations et sans pouvoir prévoir leur comportement hydraulique. Cette démarche n'est de plus pas accessible à tous les constructeurs de petites turbines, les coûts du développement initial restant trop élevés.

Elle est donc fondamentalement différente de la systématisation qui vise à paramétrer entièrement le profil hydraulique d'une turbine, puis à tester son comportement et ses performances, en fonction de l'évolution des paramètres. Cette démarche étant validée par les essais en laboratoire, les lois de similitude permettent ensuite le calcul individuel de chaque nouvelle turbine en fonction des caractéristiques exactes du site à équiper et surtout la garantie des performances. Il est ainsi possible de passer d'une méthode semi-empirique à une méthode technique précise et sans risque.

Si les deux méthodes ont en commun la recherche de solutions simples et financièrement avantageuses, seule la seconde permet de concilier les critères de simplicité, performances et fiabilité.

## **3 POURQUOI LE RENDEMENT EST-IL UN CRITERE IMPORTANT EN PETITE HYDRAULIQUE ?**

S'il peut paraître étrange de rechercher un niveau de rendement élevé et garanti pour des turbines de faible puissance, il est utile de rappeler que celui-ci n'est que le témoin d'un fonctionnement hydrodynamique optimal. Il constitue non seulement une garantie de la production à venir mais également de la fiabilité et de la longévité de la turbine.

Un mauvais rendement est en général la conséquence d'un défaut de comportement hydraulique, par exemple : défaut d'incidence de l'écoulement sur les aubes, qui peut se traduire notamment par une destruction de ceux-ci par cavitation, par des vibrations excessives engendrant des ruptures par fatigue, etc. Il est donc essentiel, que les garanties offertes en la matière soient fiables et surtout indiscutables.

De plus, faut-il le rappeler, l'assurance d'un rendement énergétique élevé et garanti de la turbine est le gage d'un rendement financier, sans mauvaise surprise, de l'investissement engagé dans l'aménagement.

Deux possibilités sont offertes à un exploitant désirant contrôler les performances de sa turbine.

La première est de mener une campagne d'**essais sur site** après la mise en service du groupe hydro-électrique. De manière à obtenir une précision acceptable, il devra utiliser des méthodes de mesure élaborées, difficiles à mettre en œuvre et souvent inappropriées aux petites installations. Il aura dès lors recours à des méthodes simplifiées, dont les résultats sont toujours discutables.

Si les essais démontrent que les garanties de puissance ne sont pas atteintes, il ne sera souvent plus possible d'améliorer la turbine. Le paiement des pénalités contractuelles par le constructeur ne compensera par ailleurs jamais la perte de production subie par l'exploitant tout au long de la vie de la turbine.

La seconde méthode consiste à effectuer des essais en laboratoire sur des turbines géométriquement semblables aux prototypes industriels. L'application des normes en vigueur dans le domaine permet la transposition précise des résultats. De plus, le comportement hydraulique de la turbine peut être observé sur l'ensemble de son domaine de fonctionnement. Il est dès lors possible de corriger les éventuels défauts **avant** que la turbine industrielle soit construite.

## 4 LA DEMARCHE SUIVIE

Comme nous l'avons dit précédemment, il n'est financièrement pas possible de réaliser un développement en laboratoire pour chaque nouvelle petite turbine en fonction des caractéristiques du site à équiper. Le concept développé par MHyLab repose donc sur la systématisation, dont les trois principes de base sont :

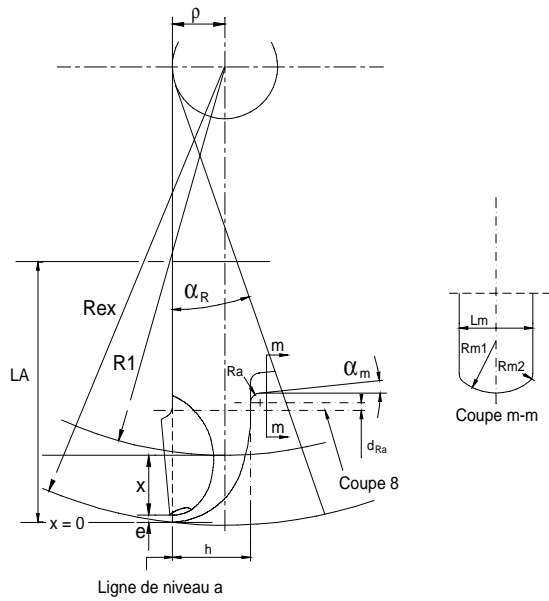
- Simplification de formes hydrauliques connues et éprouvées, utilisation d'éléments du commerce (tubes, coudes, cônes, bifurcations). Ces simplifications sont possibles sur de petites machines, la vitesse de l'écoulement pouvant être notablement réduite, sans que l'augmentation des sections n'entraîne de surcoûts significatifs. Leurs effets sont mesurés sur stand d'essais.
- Paramétrisation de toutes les formes hydrauliques en fonction des données de l'aménagement (dénivellation, caractéristique de la conduite, débit maximum), directement ou indirectement.
- Développement d'outils mathématiques et informatiques permettant de définir très rapidement l'ensemble de la géométrie de la turbine et ses caractéristiques hydromécaniques garanties (rendement et puissance en fonction du débit). Ces données sont ensuite transférées dans un logiciel de dessin 3D, lequel dessine et cote automatiquement toutes les surfaces mouillées de la turbine.

Cette méthode permet de limiter les coûts du bureau technique et de dimensionner exactement, dans le domaine requis, toutes les turbines en fonction des données spécifiques de l'aménagement.

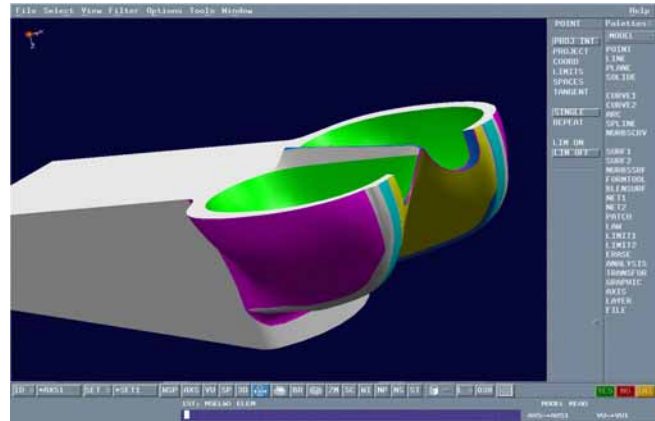
### 4.1 Illustration de la démarche

L'illustration de la démarche fait référence aux turbines Pelton, dont MHyLab a achevé le développement pour des hauteurs de chute comprises entre 60 et 600 m. Une méthode similaire pour les petites turbines axiales est en cours de développement.

Prenons à titre d'exemple le cas d'une roue motrice. La première étape a consisté à examiner dans quelles limites de vitesses spécifiques une même topologie d'auget pouvait s'adapter à l'écoulement en faisant varier des paramètres de construction de la roue.

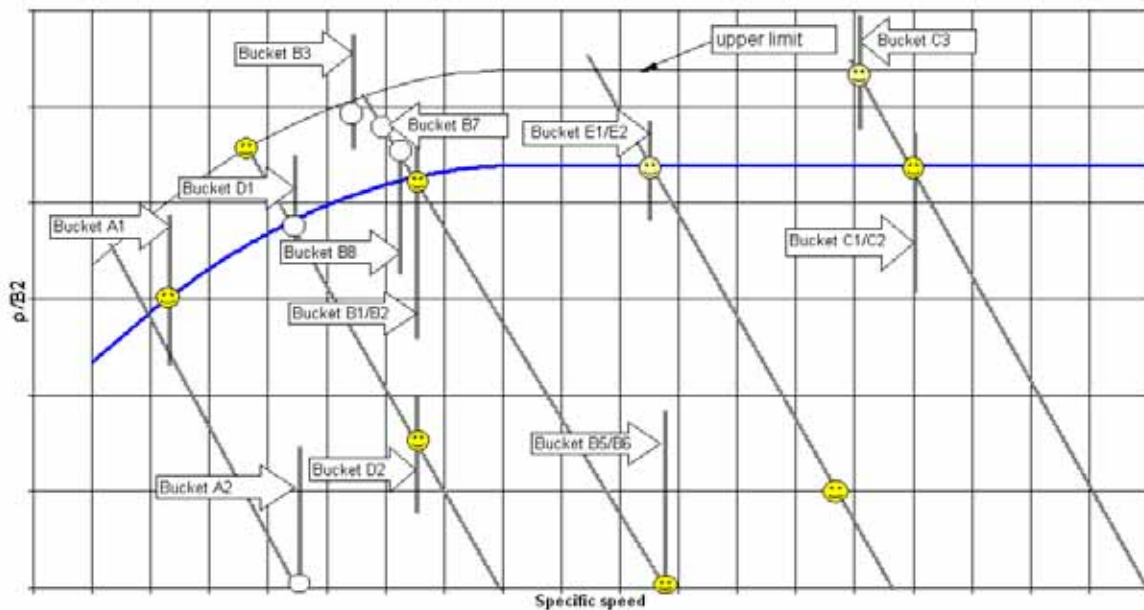


**Fig 1 Croquis d'un auget Pelton (sans dimension)**



**Fig 2 Vue 3D d'un auget Pelton MHyLab.**

Considérons un seul de ces paramètres à titre d'illustration, l'excentricité  $\rho$ . Les différentes familles d'aurages ont été conçues en imposant cette valeur pour une vitesse spécifique donnée.



**Fig 3 : Variation de l'excentricité  $\rho$  des augets d'une roue Pelton en fonction de la vitesse spécifique (schéma de principe)**

Pour une topologie définie, nous avons fait varier la vitesse spécifique, en changeant simultanément l'excentricité de manière à respecter rigoureusement les critères d'incidence de l'écoulement sur l'arête d'entrée. Pour chaque famille et chacune de ces variations, des essais en laboratoire ont validé ces lois d'évolution et en ont fixé les limites d'application.

Il a ainsi été possible de limiter le nombre de familles d'aurages permettant de couvrir l'ensemble du domaine d'application de ce type de turbine.

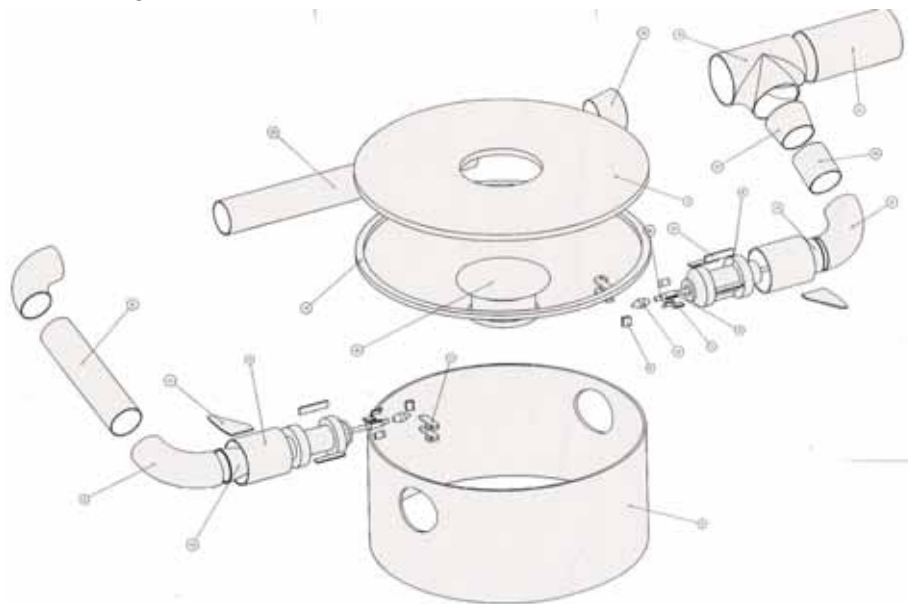
De plus, les essais réalisés ont permis de déterminer avec précision les caractéristiques de rendement de chacune des géométries, ainsi que leur évolution en fonction de la variation des paramètres constructifs.

Le développement en laboratoire, l'étude systématique des turbines et aubages, ainsi que le mode d'usinage préconisé pour la roue, permettent de **garantir** un niveau de **rendement élevé**, donc un excellent fonctionnement **hydrodynamique**. Le niveau atteint pour la gamme Pelton est de **89.5% à 90.5%**, mesuré à l'accouplement entre la turbine et l'alternateur, pour un domaine de puissance de 10 kW à 1'000 kW.

#### 4.2 Les Outils CAO

Afin de rendre efficace et pratique l'utilisation des résultats obtenus, il est nécessaire de développer de véritables outils de conception assistée par ordinateur, permettant de réduire au minimum le temps nécessaire à l'étude d'une nouvelle turbine en fonction des données de base de l'aménagement. Pour les raisons déjà évoquées au paragraphe précédent, seul le programme réalisé pour les turbines Pelton est décrit. Les étapes pour la conception d'une telle machine, suivant la méthode systématique, sont les suivantes :

- Fourniture des caractéristiques du site à équiper.
- Calcul des principales dimensions de la turbine.
- Introduction des principales dimensions dans le logiciel de CAO 3D.
- Sortie des dessins 3D et 2D.
- Fourniture des garanties de rendement.



*Fig 4 Vue 3D d'une turbine Pelton, sans la roue motrice, issue du programme de tracé automatique*

Le cahier des charges du programme est de pouvoir fournir :

- Une modélisation tridimensionnelle en vue réaliste,
- Des possibilités de vues en éclaté,
- Une mise en plan automatique conforme à la norme interne MHyLab,
- Une cotation générale sur l'ensemble,
- Des coupes avec dimensions extérieures et intérieures,
- La sélection des éléments du commerce utilisables et le dimensionnement des pièces à réaliser sur mesure, en fonction des critères d'écoulement fixés par MHyLab,
- La liste des pièces et la nomenclature

Les aubages sont obtenus à partir d'un autre logiciel, dont l'intégration au programme de dessin automatique n'est pas prévue. Leur géométrie, également paramétrée, est disponible sous forme de fichiers surfaciques, permettant leur utilisation pour la génération des parcours d'outils pour un usinage avec une machine à commande numérique. Cette manière de faire garantit ainsi que les formes issues du développement en laboratoire seront parfaitement respectées, impliquant ainsi la tenue des garanties contractuelles.

## 5 UTILISATION INDUSTRIELLE DE LA METHODE

Le succès de la méthode n'est possible que si elle permet une amélioration de la qualité du matériel construit, pour des coûts de construction et d'exploitation compatibles avec le marché. Or une telle démarche, nécessitant l'usage répétitif d'un laboratoire, n'est pas réalisable par une PME, ceci essentiellement pour des raisons financières.

C'est pourquoi MHyLab, laboratoire de mini-hydraulique, fut créé en 1993. Structuré sous forme d'une fondation à but non lucratif, son objectif est précisément d'effectuer ces travaux et de les mettre à disposition de toute personne en faisant la demande, contre paiement d'une participation aux frais de recherche, représentant une petite partie du coût de la turbine.



*Fig 5 Petite turbine Pelton de la centrale de La Rasse, 2 injecteurs, 753 kW*



*Fig6 Petite turbine Pelton de la centrale de Pas-du-Lein, 2 injecteurs, 470 kW*

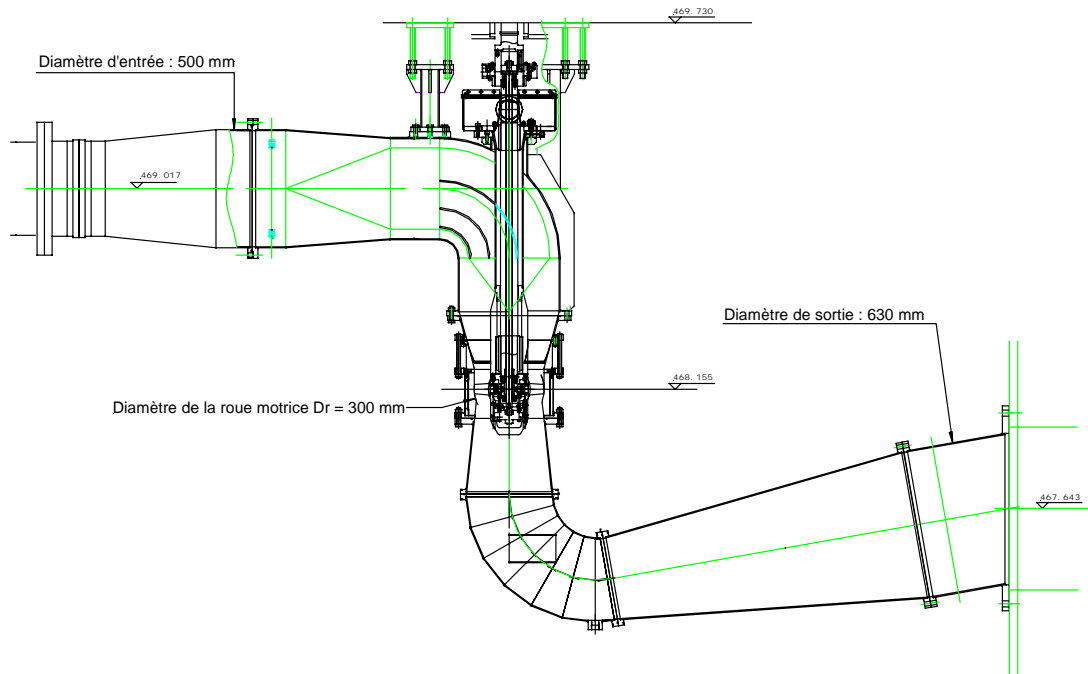
Ainsi, à partir d'une dénivellation donnée, d'une caractéristique de perte de charge et d'un débit maximal, les outils développés sur la base de la recherche en laboratoire permettent de fournir l'ensemble du profil hydraulique de la turbine et de sa roue motrice et les garanties de performances certifiées, dans un délai très bref.

L'acquisition d'un tel profil assure la réalisation d'une turbine simple à fabriquer et à entretenir, la sécurité d'un fonctionnement hydrodynamique optimal et la tenue des garanties de rendement et de puissance, tout en permettant une économie sur les frais d'étude et de développement, une réduction des délais entre la commande et la livraison de la turbine et une parfaite adéquation de la machine aux caractéristiques du site à équiper. Cette réalisation sur mesure permet en outre d'accroître la compétitivité des entreprises adoptant la méthode.

## 6 LE PROGRAMME SEARCH LHT, UN PROJET HELVETICO - EUROPEEN.

Soucieux de développer un concept similaire pour les turbines basse chute, MHyLab s'est associé aux sociétés françaises THEE et SEER, italienne SASSO SA, suisse, Romande Energie SA, ainsi qu'à l'Ecole nationale supérieure de mécanique et d'hydraulique de Grenoble et au laboratoire de machines hydrauliques de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, pour réaliser un important projet de recherche, développement et démonstration baptisé SEARCH LHT (pour Simple Efficient Axial Reliable Compact Hydro Low Head Turbine). Il est financé par la Commission européenne et la Suisse dans le cadre du programme Communautaire ENERGIE.

Les travaux en cours visent à développer de manière systématique une nouvelle gamme de turbines dans le domaine des chutes comprises entre 3 et 30 m. Deux projets de démonstration sont prévus en Isère (F) et dans le canton de Vaud (CH), ce dernier étant en cours de construction et sa mise en service étant planifiée pour le mois de septembre 2002.



*Fig 7 Dessin de principe des turbines basse chute SEARCH LHT (montage sur stand d'essai)*

Le programme prévoit, outre les développements en laboratoire, un important travail de calculs numériques d'écoulements par Euler et Navier-Stokes et leur validation par des sondages. Un pan entier de ce projet est également dévolu au développement d'un système de contrôle commande basé sur la technologie BUS, permettant la création d'un outil universel et adaptable à tout petit aménagement hydro-électrique.

Les résultats seront utilisés pour définir un concept industriel basé sur la systématisation. La construction de deux petites centrales permettra en outre d'avoir le retour d'expérience indispensable à sa diffusion à large échelle.

## 7 CONCLUSIONS

Depuis 1997, plus de 20 petites centrales Pelton ont été réalisées selon la méthode de systématisation et donnent entière satisfaction à leurs propriétaires. Elles sont autant de preuves démontrant que l'approche basée sur :

- la conception de la turbine comme une machine destinée à un petit aménagement et ceci dès le départ,
- l'utilisation d'éléments standardisés du commerce ou réalisables facilement par des ateliers locaux,
- la quantification de l'influence des simplifications dans la conception de la turbine, dans le but de déterminer la relation optimum entre les coûts (de construction, d'exploitation, etc.) et la production d'énergie,
- la garantie des performances issues des essais en laboratoire,

demeure une condition sine qua non pour la réussite d'un projet de petite hydraulique.



Cette démarche permet par ailleurs d'augmenter le niveau de rendement des petits aménagements, sans surcoût de construction, ainsi que de disposer d'outils informatiques performants, facteurs essentiels pour l'accroissement de la compétitivité des entreprises travaillant dans le domaine. Elle assure, en outre, au propriétaire de l'aménagement, une utilisation rationnelle et optimale de ses ressources en eau, tout en lui garantissant un fonctionnement hydro-dynamique sans reproche.

## 8 REFERENCES

- [1] **Chenal R., Denis V.**, De la nécessité d'entreprendre une recherche systématique en mini-hydraulique, Verbandschrift N°56 des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes, Baden, pp 165-170, 1997.
- [2] **Naacke H.**, Pour une stratégie industrielle du développement européen de l'industrie de la mini-hydraulique, actes de conférence, Hydroenergia 97, Dublin, pp 83-91, 1997.
- [3] **European Commission, DG TREN**, Renewable energy sources : small hydro sector, Proceeding of the conference, Improving market penetration for new energy technologies : prospects for pre-competitive support, Bruxelles, pp 229-244, 1996.
- [4] **Pauwels H.**, Lessons drawn from carrying out demonstration projects, Proceeding of the conference, Hydroenergia 97, Dublin, pp 145-153, 1997.
- [5] **Chenal R.**, Les objectifs du laboratoire de Montcherand, Les cahiers de l'électricité, Revue suisse de l'énergie, N°35, pp 24-29, March 1997.
- [6] **Denis V.**, Une nouvelle façon de penser la mini-hydraulique, Proceeding of the conference, Hydroenergia 97, Dublin, pp 416-425, 1997.
- [7] **Denis V.**, The role of the hydraulic laboratory in small hydro development, Hydropower & Dams, Issue four, pp 50 -52, 1998.
- [8] **Degen M., Denis V.**, Efficiency enhancing and CAD tools for small hydro, Proceeding of the conference, Hydro 2000, Bern, pp 416-425, 2000.
- [9] **Bard J., Frosio N., Papetti L., Denis V.**, European strategy document for research technological development and demonstration in small hydropower, 2002, not yet published

## 9 L'AUTEUR

**Vincent Denis**, ingénieur en génie mécanique, diplômé de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en 1992, a travaillé pendant quatre ans au sein du département aménagements hydro-électriques d'une firme internationale d'ingénierie. Suite à des études post grades en systèmes énergétiques (EPFL et hautes écoles européennes), il rejoint MHyLab en 1996. Il est actuellement responsable du laboratoire, en charge de la recherche et développement en matière de petites turbines hydrauliques. Depuis 1997, il est membre du Comité Exécutif du laboratoire.