

# **Développement d'un banc d'essais pour pico-turbines hydrauliques, validation de leurs caractéristiques et analyse de leur intégration dans un système de production**

Ir V. KELNER  
Ing. R. DACHOUFFE  
GRAMME – Liège

Ir N. DUCHESNE  
MÉRYTHERM – Tilff

*Cette étude vise tout d'abord à identifier des modèles de pico-turbines présentant des caractéristiques adaptées à la catégorie dite des "basses-chutes" hydrauliques (1,5 m de hauteur de chute et un débit de 50 l/s). Ensuite, un banc d'essais a été développé afin de fournir un outil de validation des caractéristiques hydrauliques des pico-turbines. Enfin, les techniques d'intégration et de mise en parallèle sur réseau ont été analysées.*

*Mots-clefs : hydraulique, turbomachine, turbine, turbine Kaplan, basse-chute, pico-turbine, hydro-électricité, banc d'essais.*

*This study firstly aims to identify some pico turbines with well-suited characteristics to the so called small waterfall (a head of 1,5 m and a flow rate of 50 l/s). Then, a test bed has been developed in order to provide a validation tool for the hydraulic characteristics of pico turbines. Finally, different techniques of integration and on- and off-grid solutions have been analyzed.*

*Keywords : hydraulic, turbomachinery, turbine, Kaplan turbine, small waterfall, pico turbine, hydro-power, test bed.*

## 1. Introduction

A l'heure où les ressources fossiles se font de plus en plus rares et les conséquences des gaz à effet de serre (GES) sont de plus en plus visibles, la production d'énergie durable devient une nécessité planétaire. La notion d'énergie durable recouvre les concepts :

- d'énergie verte, qui désigne une source d'énergie primaire ne produisant que très peu de polluants (tels que les GES) lors de sa transformation en énergie finale ;
- d'énergie renouvelable, qui désigne une énergie dont la source présente la capacité de se régénérer sans l'action de l'Homme.

Parmi les différents modes de production d'énergie renouvelable (éolien, solaire, géothermique, etc.), et comme l'indique la figure 1, l'énergie hydraulique occupe une place de choix.

L'une des principales tendances dans ce domaine est la montée en puissance de nombreuses centrales hydro-électriques. Toutefois, cette course à la puissance ne doit pas occulter le développement d'une tendance opposée : le marché des pico-turbines hydrauliques dont la puissance nominale n'excède pas les 10 kW.

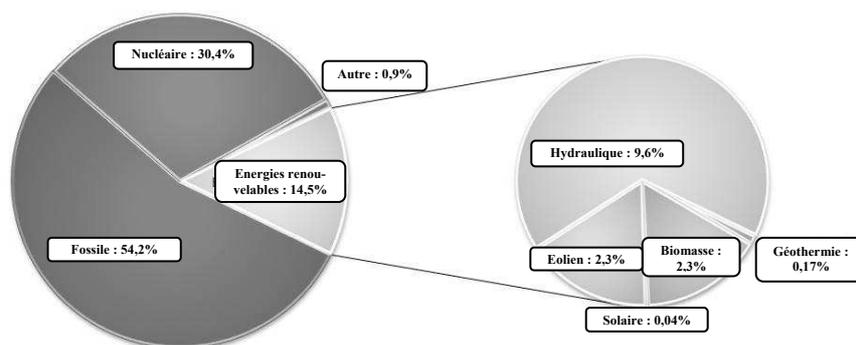


Figure 1 : Origine de l'électricité en Europe en 2006 [3]

Sur base d'un partenariat entre l'Institut Gramme, le bureau d'études Merytherm et le centre de compétence du Polygone de l'eau (Forem Formation), cette étude vise à :

1. Identifier des pico-turbines potentiellement aptes à constituer le cœur d'une pico-centrale domestique.
2. Développer un banc d'essais permettant leur mise à l'épreuve.
3. Valider les caractéristiques hydrauliques des pico-turbines.
4. Analyser leurs techniques d'intégration et de mise en parallèle sur le réseau électrique.

## 2. Les pico-turbines

### 2.1. L'hydro-électricité

En toute généralité, la puissance fournie par une centrale hydro-électrique vaut :

$$P = \rho Q g H \eta_{hyd} \eta_{mec} \eta_{elec}$$

où  $Q[m^3/s]$  désigne le débit volumique disponible,  $H[m]$  la chute d'eau nette à laquelle est soumise la turbine,  $\rho[kg/m^3]$  la masse volumique de l'eau,  $g[m^2/s]$  l'accélération gravitationnelle, et où les différents rendements correspondent aux pourcentages d'énergie récupérée à la fin des étapes de conversion d'énergie hydraulique, mécanique et électrique par rapport à la quantité d'énergie absorbée.

La hauteur de chute nette se détermine par ailleurs au moyen de :

$$H = H_b - \sum H_L - \frac{v_r^2}{2g}$$

où  $H_b$  représente la hauteur de chute brute,  $H_L$  les pertes de charges en amont et en aval de la turbine, et où le terme  $v_r^2/2g$  traduit l'énergie cinétique résiduelle en sortie de la turbine.

Les pico-turbines visées dans cette étude sont donc de petites turbines hydrauliques soumises à une hauteur de chute brute de l'ordre de deux mètres et un débit inférieur à 100 l/s, conduisant ainsi à une puissance nominale de l'ordre du kW. Ces conditions seront désignées par la suite sous le terme de "basses chutes".

Notons ici que le coût d'une centrale hydro-électrique est proportionnel à l'ampleur de l'installation. En effet, selon l'importance de la chute et du débit, les contraintes engendrent un dimensionnement plus ou moins

conséquent. A l'inverse, au droit d'une basse chute, la part de génie civil est négligeable. Cette caractéristique réduit donc considérablement l'investissement et offre l'accès à cette technique dans un cadre domestique. En outre, au vu de leur simplicité de mise en œuvre et d'entretien, les pico-centrales pourraient également ouvrir l'accès à l'électricité à de nombreuses populations dans les pays en voie de développement. Enfin, un autre avantage lié à l'exploitation des basses chutes réside dans le nombre considérable de sites potentiels. A titre d'exemple, en région wallonne, on estime que 2500 sites se prêtent à l'installation d'une pico-centrale.

## **2.2. Les critères de sélection**

Actuellement, le marché des pico-turbines est en plein essor. En effet, conscients du potentiel économique des basses chutes, de nombreux constructeurs développent des concepts "innovants", d'autres proposent des améliorations de modèles existants. Pour des raisons technologiques et économiques, ces machines font majoritairement partie de la famille des turbines Kaplan.

Afin d'identifier les pico-turbines potentiellement aptes à constituer le cœur d'une pico-centrale domestique, des critères d'évaluation d'ordre technologique, économique et social ont tout d'abord été définis.

Sur le plan technologique, la pico-turbine doit impérativement :

- offrir une gamme de fonctionnement correspondant à celle des basses chutes, en vue de permettre un fonctionnement optimum du système ;
- être équipée d'un alternateur électrique, afin d'acquérir directement le module de production complet ;
- permettre un entretien simplifié, de manière à faciliter la tâche du propriétaire.

En outre, afin de minimiser le temps de retour sur l'investissement, il est nécessaire que :

- le prix d'achat de la pico-turbine soit abordable et demeure compétitif par rapport aux autres techniques de production durable d'énergie ;

- l'intégration et l'entretien de la machine dans le système de production puissent être réalisés au moindre coût.

Enfin, d'un point de vue social, il est souhaitable :

- qu'une entreprise fiable soutienne le constructeur ;
- qu'un représentant et un service après vente soient présents au niveau européen.

### 2.3. Les modèles sélectionnés

Sur base des critères précédents, quatre modèles de pico-turbines ont été retenus.

#### *Modèle Lynx*

Cette turbine a été spécialement conçue par le constructeur français TURBIWATT pour fonctionner au droit des basses chutes. Elle n'a cependant jamais été mise à l'épreuve auparavant. Le prototype est fourni avec un alternateur logé hermétiquement dans un cylindre boulonné au-dessus de la roue à aubes. Théoriquement, cette turbine délivre une puissance de 600 W sous 1,5 m de chute et un débit de 60 l/s, soit un rendement de 68 %.



*Figure 2 : Turbine Lynx*

#### *Modèle ST-550*

Le constructeur chinois EXMORK propose un modèle d'apparence similaire au prototype précédent. L'alternateur est avantageusement équipé d'un système de gestion électronique et d'une résistance de délestage. Cette technologie permet dès lors un fonctionnement de la machine en îlotage. Le surplus d'énergie pouvant être dissipé dans la résistance contenue dans le

haut du bâti, il est en effet possible de limiter la tension produite à 230 V. Une immersion complète de la machine est cependant nécessaire afin d'assurer une bonne dissipation calorifique. Le constructeur annonce une puissance de 200 W sous 1,5 m de chute et un débit de 30 l/s, soit un rendement de 46 %.



*Figure 3 : Turbine ST-550*

#### ***Modèle MHG-500-LH***

Largement utilisée dans les pays en voie de développement, cette turbine est commercialisée par la société vietnamienne POWERPAL. Elle présente également un alternateur muni d'un boîtier de gestion électronique et d'une résistance de délestage. Cependant, l'alternateur n'est pas submergé. Par conséquent, afin de ne pas mouiller la partie haute, cette turbine doit rester proche de la surface. Ce modèle est en outre équipé d'une bêche spirale en amont et d'un aspirateur conique en aval. Théoriquement, cette turbine délivre une puissance de 500 W sous 1,5 m de chute et un débit de 60 l/s, soit un rendement de 56 %.



*Figure 4 : Turbine MGH-500-LH*

**Modèle MHG-500-LH-ID**

Selon certains utilisateurs, la fiabilité de la machine précédente n'est pas optimale. Une société allemande propose donc diverses améliorations de cette turbine afin d'offrir une meilleure pérennité et un rendement supérieur. Baptisé MHG-500-LH-ID, ce modèle amélioré se distingue par :

- l'ajout d'un système de refroidissement de l'alternateur à l'aide d'un ventilateur ;
- l'amélioration de la solidarisation des organes mobiles ;
- le forage d'orifices dans la partie tubulaire entre l'alternateur et les aubages.

Ces améliorations ont pour but d'augmenter le rendement électrique et d'empêcher la surpression des paliers hydrodynamiques suite à un éventuel encrassement.

**2.4. Pertinence et comparaison des modèles sélectionnés**

La nécessité de tester les quatre modèles présentés dans la synthèse précédente se justifie par le manque de certitudes relatives à leurs caractéristiques de fonctionnement. Comme l'indique le tableau 1, ces pico-turbines sont classées en trois catégories : prototype (modèle français), low-cost (modèles asiatiques), et low-cost amélioré (modèle vietnamien amélioré). Tandis que les données techniques de la première turbine sont clairement à établir, celles de la deuxième sont à valider, et la plus-value de la dernière est à confirmer.

Modèle	Puissance	Type	$\eta$ annoncé
Lynx	600 W	Prototype	68 %
ST-550	200 W	Low-Cost	46 %
MHG-500-LH	500 W	Low-Cost	56 %
MHG-500-LH-ID	500 W	Low-Cost amélioré	> 56 %

*Tableau 1 : Caractéristiques des modèles retenus*

Le tableau 2 résume les avantages et inconvénients respectifs des différents modèles retenus. On y observe la supériorité des machines submersibles par rapport aux turbines de surface : leur pollution visuelle est limitée et leur pose est aisée. En outre, bien qu'il ne soit pas refroidi par l'eau, l'alternateur

du modèle MHG 500 offre un accès aisé car son boîtier se situe à 30 cm de la surface.

	Lynx	ST-550	MHG-500-LH	MHG-500-LH-ID
Intégration simple	+++	+++	+	+
Discrétion visuelle	++	++	-	--
Technologie de déstagement	--	++	++	++
Facilité d'entretien	-	-	++	++
Confiance données techn.	?	--	--	---
Service après vente	?	++	+++	--
Prix	++	+++	+	-

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des modèles retenus

### 3. Le banc d'essais didactique

#### 3.1 Principe général

Le choix de la configuration du banc s'est orienté vers une mise en charge de chambres d'eau en grandeur réelle.

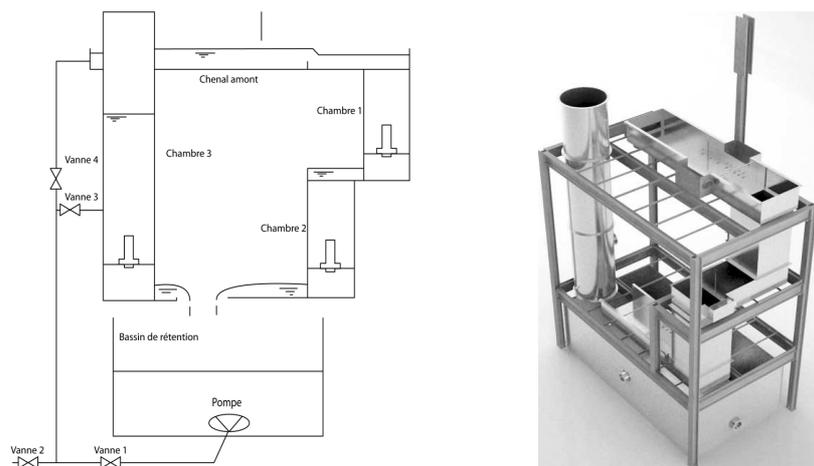


Figure 5 : Le banc didactique

Afin de pouvoir valider la modularité des futures centrales, deux chambres de 1,5 m de haut sont associées en série. Offrant des débits identiques dans chacune de ces deux chambres, cette configuration devrait permettre de valider la mise en parallèle de deux alternateurs. En vue de caractériser les turbines en dehors de leur fonctionnement nominal, une troisième chambre de 4 m de haut est prévue. En outre, cette troisième chambre devrait permettre de tester des machines qui présentent d'autres caractéristiques. Le circuit fermé est schématisé à la figure 5 (gauche). Le système complet, illustré à la figure 5 (droite), est supporté par une charpente métallique sur trois étages. Le comportement de cette structure a par ailleurs été étudié à l'aide du logiciel de calcul éléments finis Scia Engineer.

### 3.2 Equipement hydraulique et fontainerie

Les valeurs de hauteur et de débits considérées pour le dimensionnement sont les suivantes :  $H_{chute} = 1,5 m$  et  $Q = 50 l/s$ .

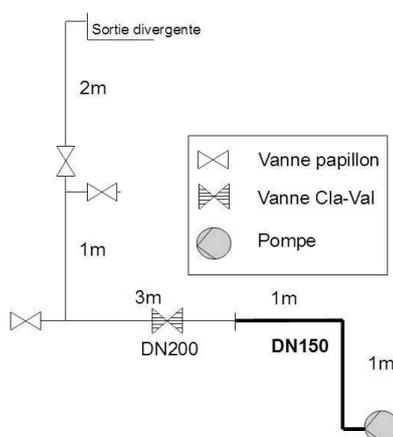


Figure 6 : Ligne hydraulique en aval de la pompe

Schématisée à la figure 6, la ligne hydraulique en aval de la pompe comprend des conduites DN200 en PVC transparent et collés, ainsi que des tuyaux DN150 en acier inoxydable. Les vannes 2, 3 et 4 sont des vannes pneumatiques DN200 de type papillon qui peuvent être aussi actionnées manuellement. Assurant une fonction de régulation, la vanne 1 est une vanne de type Cla-Val (modèle 429-01 CFM9). Immersée dans le bassin de rétention, la pompe est quant à elle de type centrifuge.

### 3.3 Electronique de mesure

Les organes de mesure fournissent à l'automate une image du mesurande via un signal 4-20 mA.

La mesure du débit est réalisée à l'aide d'un débitmètre électromagnétique placé sur la conduite DN150. Le niveau d'eau dans les trois chambres est mesuré au moyen de transmetteurs de pression à tube borgne, vissés dans le fond des cuves. Le niveau d'eau dans le bassin de rétention est quant à lui évalué à l'aide d'un capteur capacitif. La détection d'un éventuel débordement d'un chenal est assurée par un capteur d'overflow.

### 3.4 Gestion électrique et automation

L'architecture électrique du banc didactique comprend d'une part un coffret de puissance, et d'autre part un coffret de gestion.

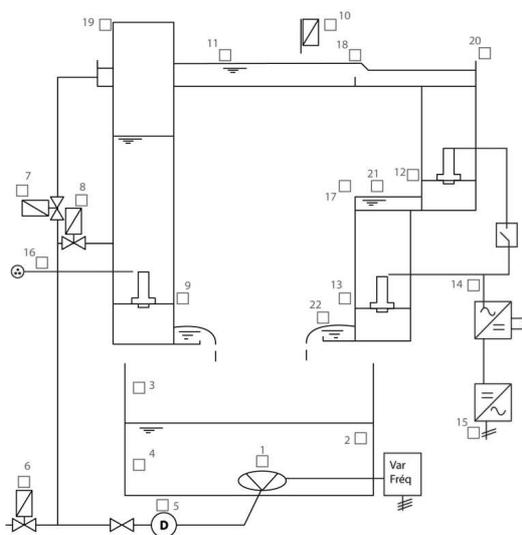


Figure 7 : Schéma signalétique

Le coffret de puissance contient les disjoncteurs, les protections magnétothermiques et différentielles, le variateur de fréquence, ainsi que les alimentations pour les organes de mesures. L'automate et le régulateur de niveau (PID) se trouvent quant à eux dans le coffret de gestion. Comme l'indique la figure 7, un total de 13 entrées analogiques et 12 entrées

digitales sont fournies à l'automate qui renvoie 19 valeurs digitales et une valeur analogique.

## 4. Le pilote d'appoint

Le dimensionnement du banc d'essai didactique ayant été approuvé par le Polygone de l'eau, sa réalisation pratique a ensuite été envisagée. Cependant, la longueur des procédures bureaucratiques nous a conduit à concevoir un pilote d'appoint. Néanmoins, la procédure administrative suit son cours et le banc didactique devrait être construit dans un futur proche.

### 4.1 Principe général et état des lieux

Comme l'illustre la figure 8, une chute d'environ 1,5 m - imposée par le niveau de l'Ourthe - est disponible au droit de l'exutoire à poisson de la centrale hydraulique présente sur le site de Merytherm.

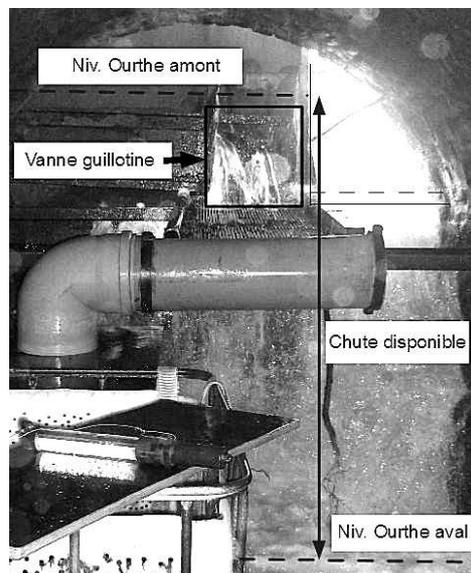


Figure 8 : Exutoire à poisson

Au travers de deux configurations, le banc d'essai d'appoint exploite cette hauteur de chute selon le schéma de la figure 9. Le relevé des mesures électriques est ici assuré par un contrôleur industriel qui indique la tension

et le courant, le triangle des puissances, et la fréquence. Un oscilloscope permet en outre d'analyser l'aspect du signal fourni par les génératrices. La puissance fournie est consommée au travers de charges purement résistives : des spots halogènes de 200 W et/ou une ampoule de 100 W.

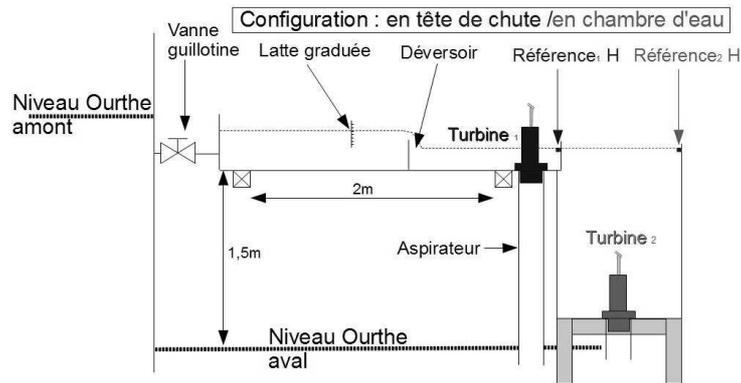


Figure 9 : Le banc d'appoint

#### 4.2 Techniques de mesure

Les essais se déroulent à hauteur constante. Afin de permettre le réglage du niveau d'eau dans la goulotte, un point de référence est marqué près de la turbine (fig. 9). Une régulation manuelle permet d'approcher cette consigne au plus près lors de chaque variation de charge électrique.

La mesure du débit turbiné s'effectue par lecture du niveau d'eau  $\Delta h$  sur la latte graduée (fig. 9) :

$$Q = C L \Delta h \sqrt{2 g \Delta h}$$

où  $L$  désigne la longueur du déversoir, et  $C$  un coefficient fonction de la géométrie du déversoir ( $C = 0,4$  dans le cas d'un déversoir plat à paroi mince de pleine largeur).

### 5. Résultats des tests

Les caractéristiques hydrauliques et le rendement global des quatre pico-turbines sélectionnées ont été déterminés à l'aide d'une vaste campagne de mesures réalisées sur le banc d'appoint. Ces résultats permettent d'identifier les pico-turbines les plus efficaces.

## 5.1 Courbes caractéristiques

Sur base de la loi des similitudes hydrauliques, les courbes caractéristiques du débit et de la puissance en fonction de la hauteur de chute sont présentées respectivement aux figures 10 et 11.

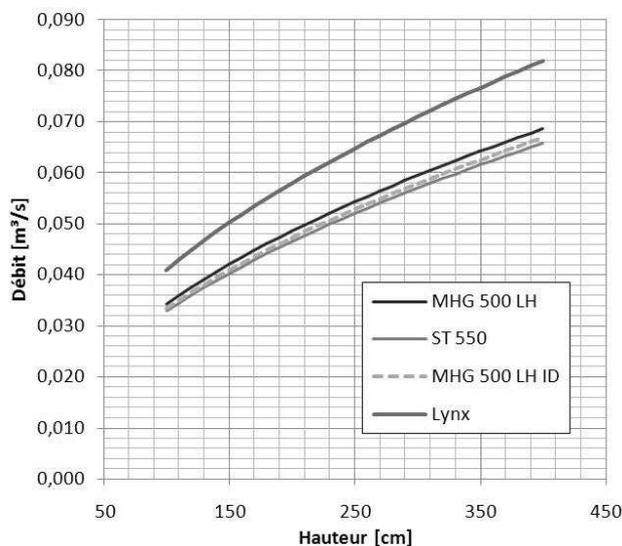


Figure 10 : Caractéristiques Débit vs Hauteur de chute

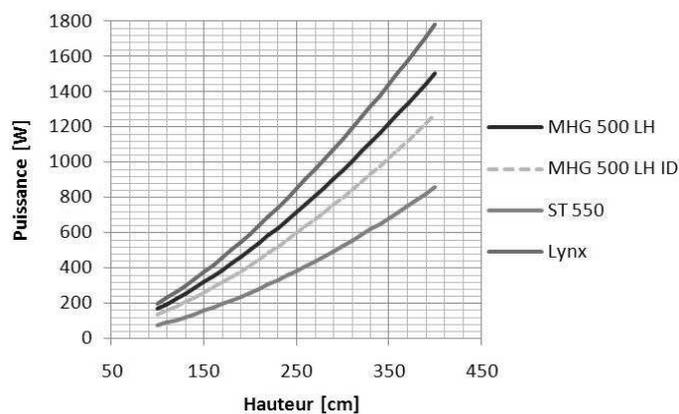


Figure 11 : Caractéristiques Puissance vs Hauteur de chute

Sous une hauteur de chute constante, une variation de la charge de l'alternateur engendre une variation de sa vitesse de rotation. Cette variation

modifie par conséquent le débit turbiné et la puissance hydraulique fournie au système. Les courbes de rendement obtenues par une modification de la charge électrique - et sous une hauteur de chute constante de 1,6 m - sont présentées aux figures 12 et 13.

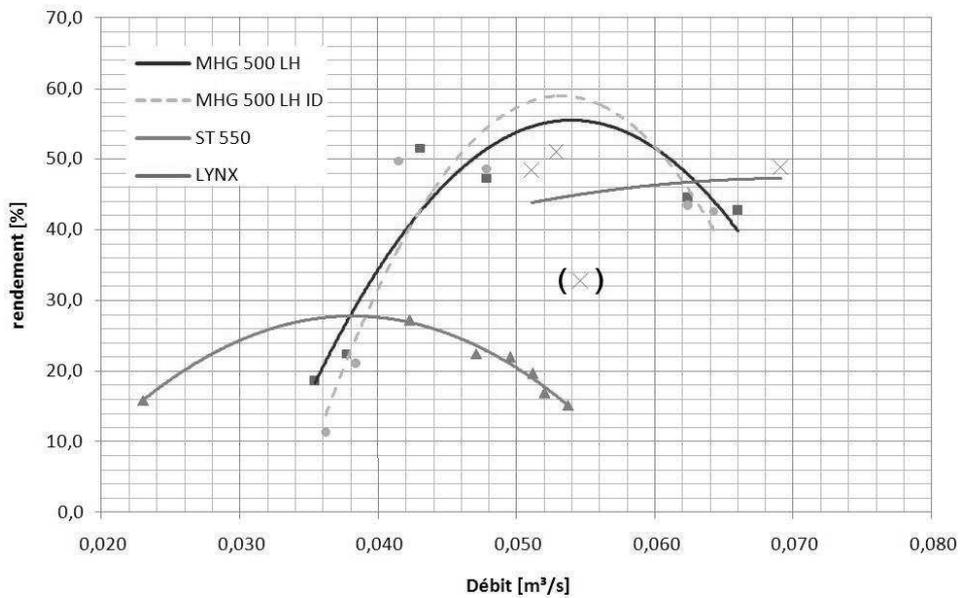


Figure 12 : Rendement vs Débit (sous 1,6 m de chute)

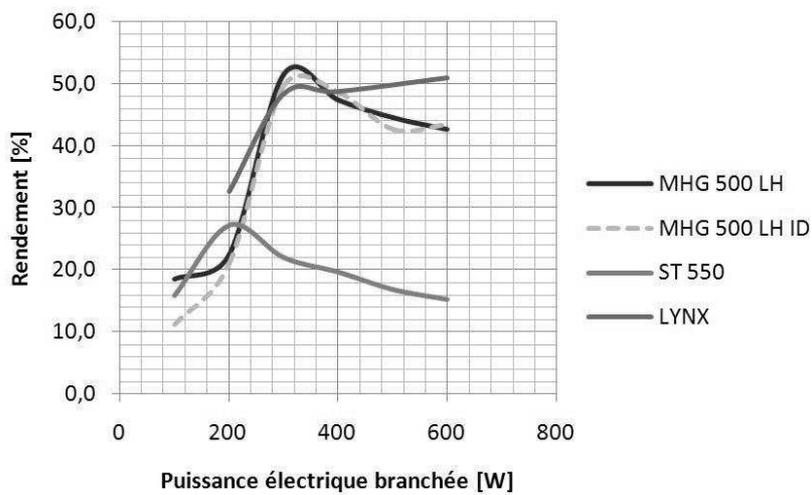


Figure 13 : Rendement vs Charge électrique (sous 1,6 m de chute)

## 5.2 Analyse

Résumés dans le tableau 3, les résultats précédents indiquent que les modèles Lynx et MHG-500-LH sont les plus intéressants. En effet, le prototype Lynx fournit d'avantage de puissance, alors que la pico-turbine MHG-500-LH propose un rendement plus élevé. Les améliorations apportées au modèle MHG-500-LH-ID ne semblent pas significatives.

Modèle	P mesurée [W]	Q mesuré [l/s]	$\eta$ annoncé	$\eta$ max. mesuré
Lynx	410	53	68 %	50 %
ST-550	190	41	46 %	30 %
MHG-500-LH	360	41	56 %	55 %
MHG-500-LH-ID	300	43	> 56 %	55 %

Tableau 3 : Performances réelles sous 1,6 m de chute

## 6. La gestion électrique

Les pico-turbines sont équipées d'un alternateur à aimants permanents. Bien que simple et robuste, cette technologie ne permet aucune prise sur l'excitation du rotor, et empêche donc toute synchronisation directe de la génératrice sur le réseau.

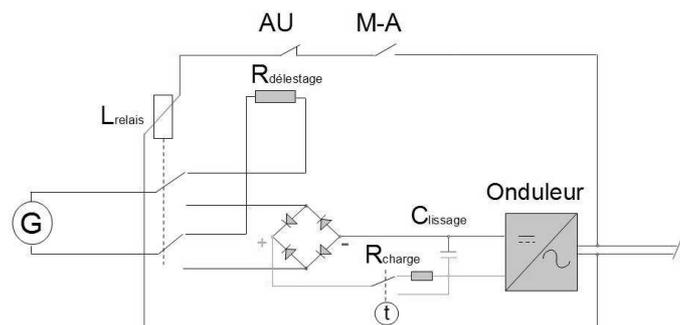


Figure 14 : Ligne électrique de mise en parallèle sur le réseau

Un raccordement au réseau est néanmoins envisagé au moyen du montage schématisé à la figure 14.

Ce montage comprend :

- un onduleur solaire (DC/AC) qui permet la mise en parallèle sur le réseau ;
- un module de traitement du signal (AC/DC) qui comprend un pont de diodes et un condensateur ;
- un module de gestion de tension qui dissipe l'énergie produite dans une résistance de délestage lorsque la ligne de sécurité est ouverte ;
- une résistance ( $R_{charge}$ ) connectée en série sur le condensateur qui limite le courant de charge  $I_c(0)$  :

$$I_c(t) = \frac{\left( U_c \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right)}{R}$$

La méthode est largement simplifiée dans le cadre d'une utilisation en îlotage puisque les turbines peuvent être directement connectées au circuit de consommation.

## 7. Conclusions

Le potentiel de la pico-hydroélectricité domestique est prometteur, tant en région wallonne que dans de nombreux pays en voie de développement. Sur base de critères d'ordre technologique, économique et social, quatre modèles de pico-turbine ont été sélectionnés sur un marché mondial en plein essor.

Un premier pilote a été développé afin de valider les données des constructeurs de ces machines. Des contraintes administratives nous ont conduit à réaliser un second banc d'essais. Ce dernier, construit au droit d'une chute d'eau existante a permis de tester les pico-turbines sous une hauteur de chute constante. Enfin, un système de synchronisation au réseau électrique a été envisagé et dimensionné.

## 8. Sources

[1] ASCH G., *Les capteurs en instrumentation industrielle*  
Paris, Dunod, 2000.

[2] Cla-Val (page consultée en juin 2010).  
<http://www.cla-val.ch>

[3] DACHOUFFE R., *Développement d'un banc d'essai pour picoturbines hydrauliques, validation de leurs caractéristiques et analyse de leur intégration dans un système de production*  
Belgique, Institut Gramme, Travail de fin d'études, 2010.

[4] JENKINS N., *Electrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération*  
Paris, Dunod, 2008.

[5] KELNER V., *Machines hydrauliques*  
Belgique, Institut Gramme, Notes de cours, 2009.

[6] LEONARD O., *Machines hydrauliques*  
Belgique, Université de Liège, Notes de cours, 2008.

[7] MARECHAL D., *Laboratoire de machines hydrauliques*  
Belgique, Institut Gramme, Notes de cours, 2009.

[8] MARTIN, J., TCHOUATE HETEU, P., *La filière hydraulique : Aspects technologiques et environnementaux*  
<http://sites.uclouvain.be/term/recherche/TRACTEBEL/WP5-TERM.pdf>