

Etude de faisabilité technique : conception d'un nouveau type d'hydrolienne

Ing. E. SCHLOUNE
Dr Ir V. HANUS
PIERRARD – Virton

Cet article traite de l'étude de faisabilité technique, réalisée au centre de recherche FoRS, concernant la conception d'un moyen de production hydroélectrique pouvant être utilisé sur une faible hauteur de chute (de 1 à 2 m) avec un débit de cours d'eau allant de 0,4 à 1 m³/s pour une puissance escomptée entre 1 et 5 kW. Ce moyen de production est basé sur le principe d'une roue de type « Poncelet ».

Mots-clefs : hydraulique, hydroélectricité, faible chute, simulations hydraulique, essai.

This article presents the study conducted at the research center FoRS for the design of a hydroelectric generator that can be used for a low head (between 1 and 2 m) with a stream flow between 0,4 and 1 m³ /s for an expected power between 1 and 5 kW. The principle used is the millwheel "Poncelet".

Keywords : hydraulic, hydropower, low head, hydraulic simulations, test.

1. Introduction

« Dans le cadre de ses obligations relatives à la Directive européenne concernant la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, le Gouvernement wallon s'est engagé à produire, à l'horizon 2020, 8000 GWh d'électricité verte, dont 400 GWh provenant de l'hydro énergie », explique Dominique Simon, inspecteur général du Département Énergie et Bâtiment durable en Wallonie. « Si l'installation de centrales de grosse puissance au droit des barrages sur les voies hydrauliques permettra l'atteinte de la majeure partie de ces objectifs, la contribution de petits sites hydro énergétiques à réhabiliter est également à considérer ». [3]

C'est dans cette optique qu'une étude de faisabilité technique a mis en place le projet CIEX POWER®. Ce projet consiste à concevoir une hydrolienne d'une puissance de 1-5 kW, adaptée aux retenues de faible hauteur d'eau (1 à 2 m), à partir d'une simulation, et de tester un prototype pour recouper les résultats de simulation.

Afin d'être dans des conditions favorables pour la rentabilité du projet, l'optimisation s'est faite dans le but de minimiser les coûts. On peut trouver sur le marché des turbines très efficaces qui sont associées à un travail de génie civil important, ce qui grève la rentabilité des projets. La philosophie adoptée est donc d'utiliser un principe de fonctionnement que l'on sait moins efficace, mais qui présente des coûts plus modestes à l'installation et à l'investissement.

2. Simulation hydraulique

L'aspect hydraulique est le point de départ du projet, la source de l'énergie renouvelable étant l'énergie donnée par le cours d'eau. La simulation hydraulique permet de valoriser au maximum cette énergie.

2.1. Hypothèses

Voici les différentes hypothèses simplificatrices fixées au départ pour la simulation hydraulique.

La première hypothèse est une configuration de base. La machine est basée sur le type de roue « Poncelet » (figure 1). Ce type de roue est la roue qui correspond le plus aux caractéristiques hydrauliques (chute, débit) de l'hydrolienne étudié. M. Poncelet a voulu améliorer le rendement de la roue dite « par-dessous » tout en conservant ses avantages. La roue créée par M. Poncelet atteignait un rendement d'environ 55%. Pour cela, il a cherché à obtenir [1,2,5] :

- une entrée de l'eau sans choc,
- une sortie de l'eau sans vitesse circonférentielle.

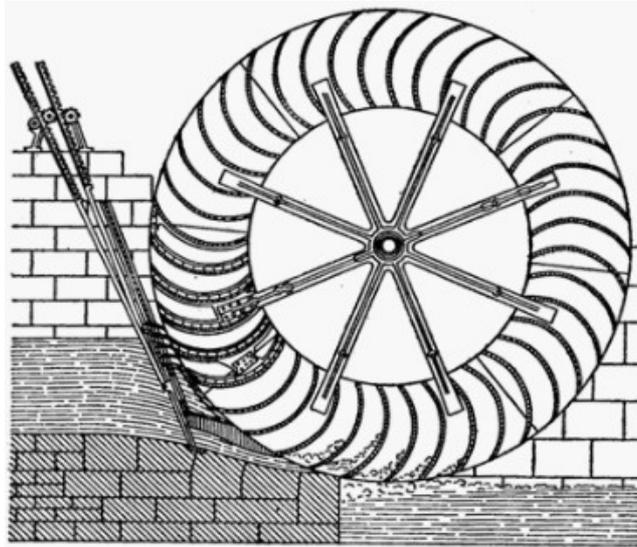


Figure 1 : Roue Poncelet

La seconde hypothèse est un choix dimensionnel. Pour être facilement transportable (voire amovible), la largeur de la machine est fixée à 1,4 m pour un diamètre de roue de 2 m. Il faut savoir que ce choix s'éloigne du choix original de M. Poncelet, qui produisait des roues avec un diamètre pouvant atteindre 4 m.

Une configuration hydraulique est fixée pour les besoins de la simulation. Les paramètres choisis sont :

- une hauteur de chute de **1 m** ;
- un débit d'entrée étant fixé par la section de passage définie par une ouverture de **15 cm** de haut et la largeur de la machine.

L'ouverture de la vanne a été choisie de façon empirique selon les recherches sur les roues « Poncelet ».

2.2. lame d'eau

Le débit d'eau est fonction de la hauteur de l'ouverture de la vanne : celle-ci détermine une section avec la largeur de la roue. La vitesse du fluide associée est obtenue par le théorème de Bernoulli, en négligeant les pertes de charge dues à la vanne :

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - A)} \quad (1)$$

avec V = vitesse du fluide attaquant la roue,
 g = accélération de la pesanteur,

H = hauteur du fluide devant la vanne, et

A = hauteur supérieure de la lame d'eau lors de son entrée dans la roue.

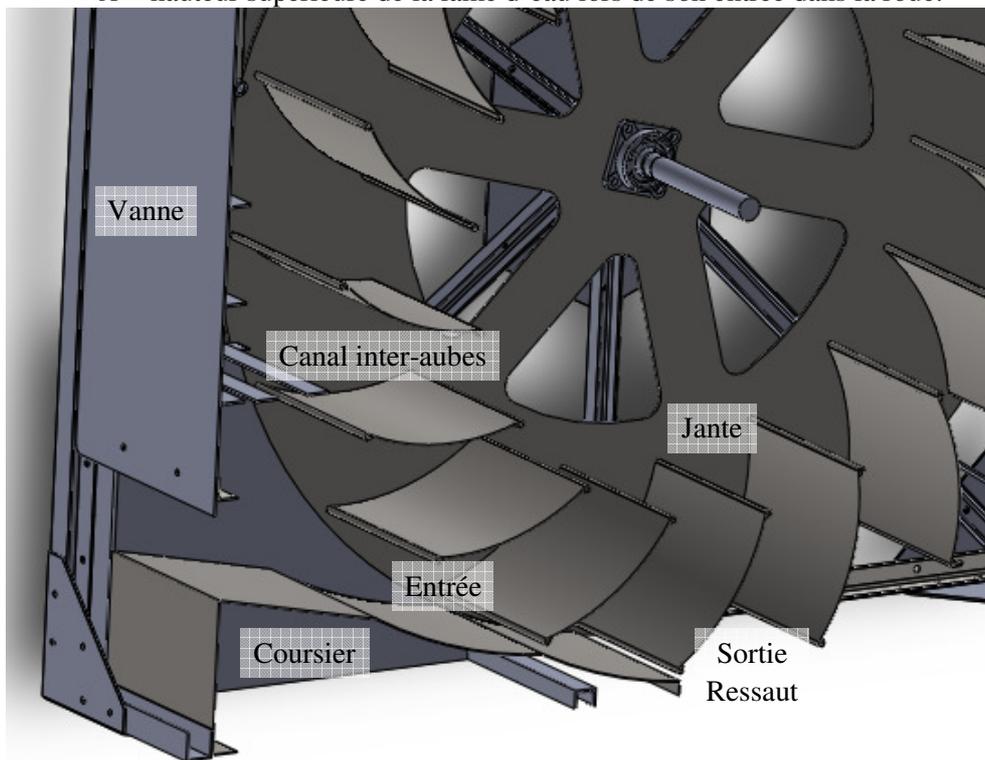


Figure 2 : Éléments d'une roue

La hauteur A dépend de la forme du coursier et du positionnement du ressaut (voir figure 2). Le coursier est l'élément permettant (avec l'aube) d'amener l'eau avec le bon angle d'introduction. Le ressaut est la portion où l'eau s'évacue de la roue. La distance entre le coursier et le ressaut doit au moins couvrir l'angle entre deux aubes (voir section 2.4).

Pour conserver le même angle d'introduction de la lame d'eau dans la, il faut que le coursier soit en développante de cercle. Cette courbe permet donc de calculer, selon l'épaisseur de la lame d'eau, l'angle d'introduction de l'eau dans la roue.

2.3. Triangle des vitesses à l'entrée

La formule d'Euler permet d'évaluer la puissance \dot{W} cédée par le fluide lors de la traversée de la roue :

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot (U_1 \cdot V_{\theta,1} - U_2 \cdot V_{\theta,2}) \quad (2)$$

avec \dot{m} = débit massique,

U_1 = vitesse d'entraînement de la roue à l'entrée du fluide dans la roue,

$V_{\theta,1}$ = vitesse circonférentielle du fluide à l'entrée du fluide dans la roue,

U_2 = vitesse d'entraînement de la roue à la sortie du fluide de la roue, et

$V_{\theta,2}$ = vitesse circonférentielle du fluide à la sortie du fluide de la roue.

La vitesse d'entraînement de la roue est liée à la vitesse de rotation de la roue ($U = \omega.r$). Pour la conception de sa roue, M. Poncelet préconise [4] :

$$U = 0,55.V \quad (3)$$

Pour connaître entièrement le triangle des vitesses, une troisième vitesse est nécessaire : la vitesse débitante V_r traverse un certain arc de la roue θ , déterminé par l'épaisseur de la lame d'eau et la forme en développante du coursier. On obtient ainsi :

$$\dot{V} = V_r.\theta.r.L \quad (4)$$

avec \dot{V} = débit volumique, et

r = rayon extérieur de la roue, et

L = largeur de la roue

Ces trois vitesses (V , U et V_r) déterminent entièrement le triangle des vitesses (voir figure 2). Cela permet de fixer l'angle β que l'aube doit avoir pour que l'introduction de l'eau se fasse sans déviation du fluide (sans perte de charge par choc).

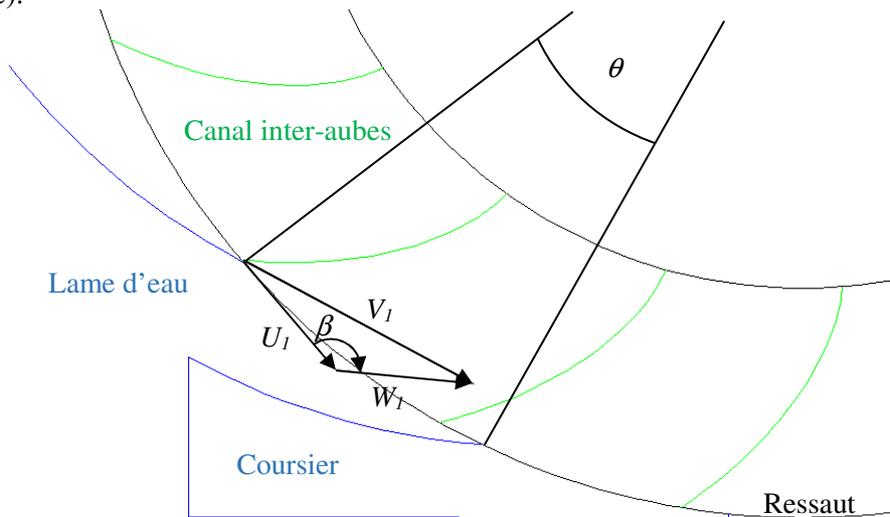


Figure 2 : Triangle de vitesses

2.4. Aubes et jantes

Le nombre d'aubes a été fixé à 18. Ce nombre doit être suffisant pour bien canaliser l'eau, mais ne pas être trop important pour ne pas avoir trop de pertes par frottement

Pour que l'eau n'accélère pas au fur et à mesure qu'elle circule entre deux aubes, il faut que les aubes soient en développante de cercle. La géométrie en développante de cercle permet de garder un canal inter-aubes de section constante.

La jante est l'élément en forme de disque permettant d'attacher les aubes et de fermer le secteur d'aube sur le côté. La hauteur de celle-ci est déterminée par une conservation du débit. En un tour, la jante se remplit une fois, et un certain débit la traverse.

$$\dot{V} = \frac{L.U}{2.R} (r^2 - (r - j)^2) \quad (5)$$

avec j = épaisseur de la jante.

2.5. Puissance mécanique recueillie à la roue

Afin d'évaluer correctement l'équation (2), il importe de connaître comment l'eau quitte la roue. Comme mentionné à la section 2.4, l'aube a la forme d'une développante de cercle. On suppose que l'eau est guidée parfaitement selon cette courbe, ce qui équivaut à avoir un nombre infini d'aubes. L'eau est accélérée pour sa sortie par deux forces :

- la pesanteur, et
- la force centrifuge (dans le repère tournant de la roue).

Ces deux forces sont donc appliquées sur la colonne de fluide emprisonnée entre deux aubes et intégrées. L'accélération s'en déduit et, après intégration, la vitesse de sortie au fur et à mesure que le canal inter-aubes se vide. Au moyen de la géométrie de l'aube déjà déterminée, cette vitesse de sortie permet de déterminer le triangle de vitesse à la sortie, et donc le terme $U_2.V_{\theta,2}$ de l'équation (2), qui s'obtient par intégration sur tout le secteur où l'eau sort.

Une correction doit être introduite, car la formule d'Euler (équation (2)) suppose que la différence de hauteur entre l'entrée et la sortie de la machine est négligeable. Or cela n'est pas le cas : l'eau dans le canal inter-aubes remonte verticalement si elle n'est pas évacuée suffisamment rapidement. Il faut donc rajouter un terme qui tient compte de cette énergie potentielle éventuellement restituée.

2.6. Résultat de la simulation hydraulique

Après optimisation, le rendement simulé est de 62%. Ce rendement est le ratio entre la puissance hydraulique brute et la puissance hydraulique nette récupérée par la roue « à l'arbre ». Il tient compte de l'optimisation de la position du ressaut ainsi que de l'angle couvert par le coursier (minimum un secteur entre deux aubes). Néanmoins, celui-ci ne comprend pas les autres rendements tels que le rendement électrique ou mécanique.

Ce résultat est obtenu en négligeant certains phénomènes :

- l'étranglement de la veine de fluide à la vanne d'entrée ;
- le frottement de fluide sur les aubes et le coursier ;
- les tourbillons lors du remplissage du canal inter-aubes ;
- la hauteur de dégagement : pendant les essais, on remarque qu'il faut environ 20 cm de hauteur au niveau du ressaut pour que l'eau s'évacue sans problème ; en tenant compte de cette hauteur, le rendement tombe à 52%.



- 1 : Aménée d'eau à la turbine existante
 2 : Système de vannage
 3 : Déversoir (se jetant dans le canal de dérivation)
 4 : Canal de dérivation

Figure 3 : Site de Pierrard

3. Essais réalisés

3.1. Description du dispositif expérimental

Les essais se sont déroulés sur le site des Art et Métiers Pierrard à Virton (figure 3). Le cours d'eau exploité ici est le Ton. Sur le site, il existe déjà une turbine. Le prototype de l'hydrolienne est placé dans le canal de dérivation. La photo ci-dessous montre la situation.

Le canal de dérivation a une largeur de 3,2 m, ce qui est problématique pour placer le prototype qui a une largeur totale de 1,6 m. La solution consiste à placer des blocs bétons empilables dans le cours d'eau afin de diminuer la largeur de celui-ci et permettre à toute l'eau de passer dans la machine (figure 4). En superposant 2 blocs béton, on obtient une retenue d'eau de 1,2 m, ce qui est suffisant dans un premier temps pour les essais. Si la hauteur d'eau dépasse 1,2 m, les blocs permettent de laisser passer le surplus comme un déversoir.

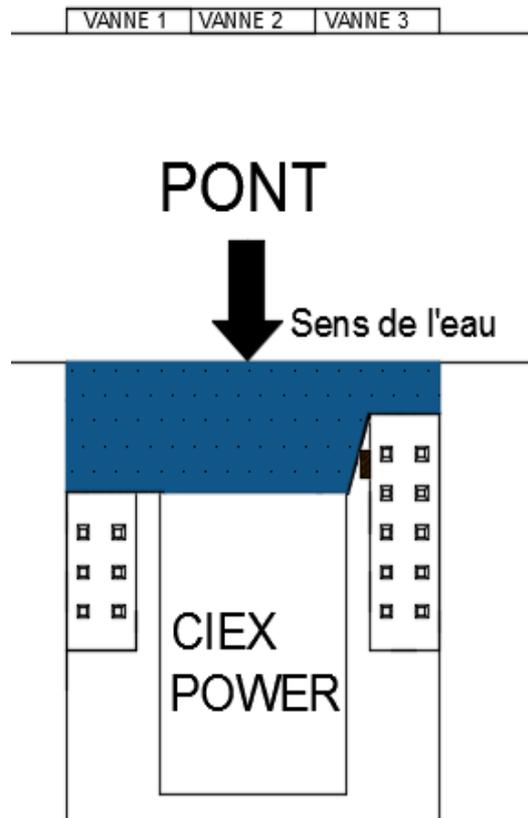


Figure 4 : Dessin de l'installation

Dans la configuration des tests, l'hydrolienne est positionnée dans le canal de dérivation (figure 5). Cette configuration ne permet pas d'avoir une solution de secours lors de crue éventuelle. En sachant cela, un système d'élévation a été imaginé. Il permet deux fonctions :

- L'horizontalité de la machine : Il garantit le dégagement sous la machine mais également de ne pas avoir des efforts latéraux sur les paliers. Ce système permet également de laisser passer l'eau sous la machine lors de l'arrêt des essais.
- La hauteur de dégagement : Cette dernière est importante, car si le dégagement n'est pas assez grand, l'eau ne peut pas s'évacuer et freine la roue dans son mouvement. La hauteur du dégagement est un paramètre à prendre en compte lors des essais.



Figure 5 : Prototype dans le canal de dérivation

3.2. Protocole de mesure

Lors des essais, le nombre de paramètres étudiés a été limité. Ceux-ci sont :

- le niveau de levée de vanne : il détermine le débit réel passant dans la machine ; ce débit est en fonction de la hauteur d'eau et de la section de passage ;
- la fréquence imposée par le variateur : elle fixe le point de fonctionnement au niveau de la vitesse de rotation du générateur ; le système de variateur de fréquence permet de transformer le moteur asynchrone en générateur à une fréquence fixée.

Les paramètres qui sont fixés sont :

- Configuration de la machine (aubes fixes)
- Hauteur d'eau devant la machine
- Hauteur de dégagement

La prise en compte de ces paramètres aurait été intéressante lors des essais pour voir l'influence que ceux-ci ont sur le fonctionnement de l'hydrolienne. Ils devront être pris en compte lors d'une campagne d'essais ultérieure.

3.3. Campagne de mesures

Lors de la campagne de mesures (voir figures 6 et 7), les essais ont été axés sur la levée de vanne (et donc le débit en abscisse) et de la fréquence fixée par le variateur (et donc la vitesse de rotation en ordonnée).

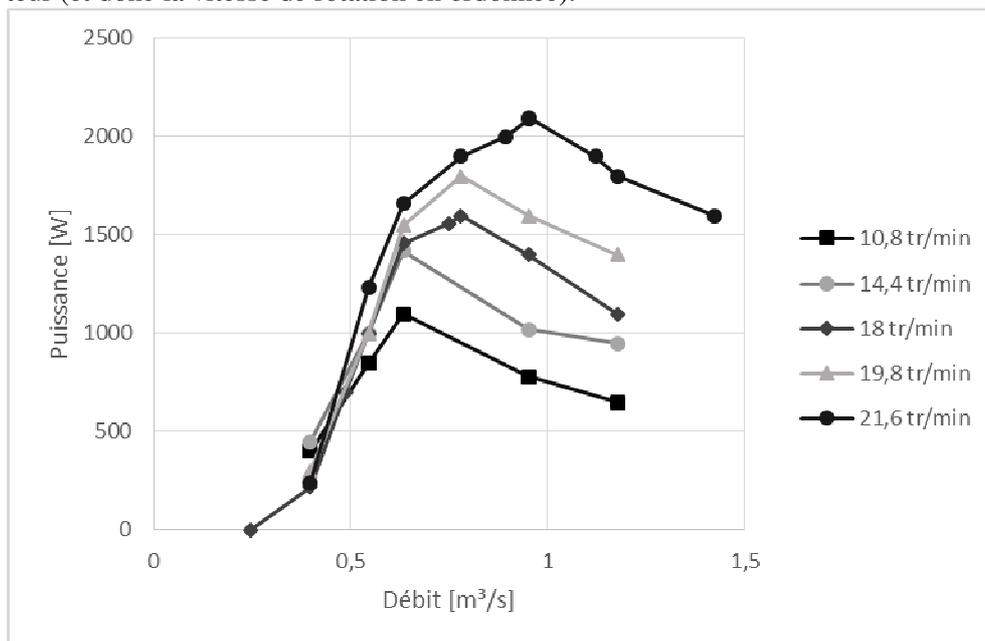


Figure 6 : Puissance électrique délivrée en fonction du débit et de la vitesse de rotation

Les courbes caractéristiques de la figure 6 montrent qu'il y a un intérêt à faire tourner la roue plus rapidement que le design prévu (18 tr/min). On remarque qu'avec un débit important, la puissance diminue, du fait de l'évacuation plus compliquée de l'eau.

En valeur absolue, les valeurs obtenues (2100 W au maximum) sont loin de la puissance simulée (3500 W). Deux éléments expliquent ce différentiel important :

- Le système de transmission est une courroie, qui présente un certain glissement. Après un réglage approprié de la tension, le prototype a été en mesure de récupérer 500 W supplémentaires.
- Après les essais, une mesure des pertes à vide de la machine a montré qu'elles sont importantes (1000 W).

En tenant compte des pertes mécaniques, la simulation est vérifiée du point de vue de la puissance mécanique récupérée par la roue.

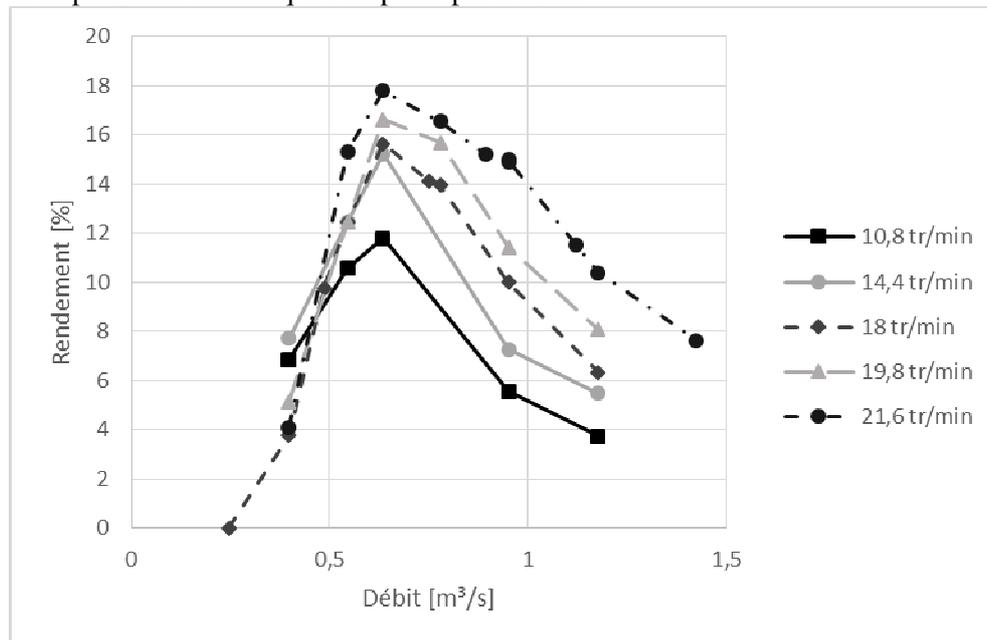


Figure 7 : Rendement en fonction du débit et de la vitesse de rotation

Les rendements affichés à la figure 7 sont à comparer aux 52% théoriques de la section 2.6. Les raisons expliquant le différentiel de puissance permettent aussi d'expliquer la différence de rendement entre théorie et essais.

Il est à remarquer que le pic de rendement s'obtient pour un débit de 0,65 m³/s, alors que le pic de puissance apparaît pour un débit plus important (1 m³/s). Cela montre que le rendement n'est pas toujours un indicateur pertinent, car l'énergie hydraulique est gratuite :

- Lorsque les débits sont importants par rapport au point nominal de la machine, il faut produire un maximum de puissance, même si c'est avec un faible rendement de conversion.
- Lorsque les débits sont proches du point nominal, il faut tendre à avoir le meilleur rendement, afin de valoriser au mieux l'énergie hydraulique qui se fait rare.

4. Pistes d'amélioration

Le prototype et les essais ont permis de valider ou non les choix techniques posés et vérifier la simulation hydraulique. Les pistes d'amélioration se retrouvent à chaque niveau de la conception.

4.1. Améliorations mécaniques

La rigidité du cadre (face avant, fond et arrière) doit être revue avec des éléments de triangulation. La conception « mécano » donne satisfaction, mais certains jeux/ajustements doivent être revus, notamment pour éviter certains problèmes lors de la galvanisation des éléments.

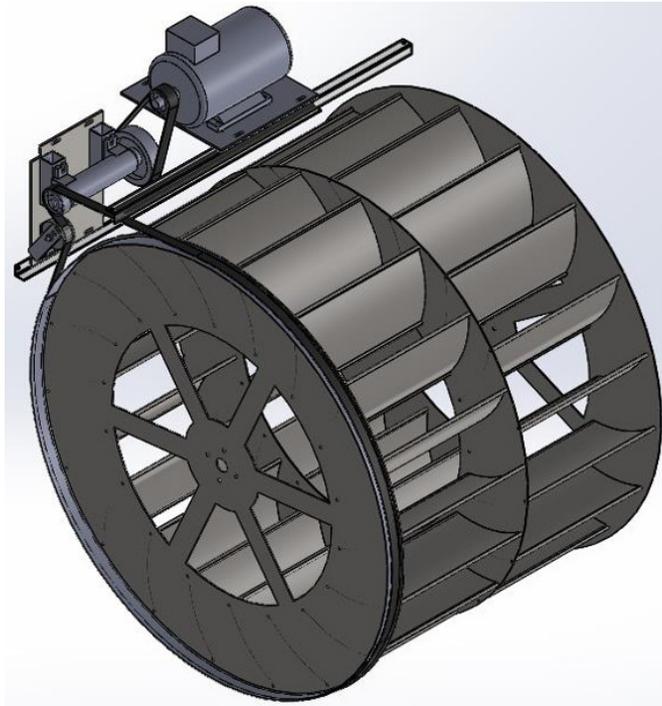


Figure 8 : Représentation du système de transmission

Le système de transmission initialement prévu est une courroie de type « poly-V » (voir figure 8). Le prototype a mis en évidence un problème de glissement ainsi qu'un problème de tension ; à cela s'ajoutent des pertes à vide importantes. Les solutions possibles sont :

- augmenter l'angle d'enroulement de la poulie menée ;
- isoler la courroie de l'eau, ce qui semble difficile ;
- passer à un système pignon/chaînes qui serait plus facile à mettre en œuvre et où le glissement serait plus limité.

Le système de mise à niveau est intéressant pour les essais sur le site de test, mais n'est pas nécessaire lors d'une installation où la machine n'a pas besoin de monter ou descendre. Dans ce cas de figure, la machine peut être posée sur un socle ou des pieds fixes. Le système étant composé de vérins hydrauliques, d'une pompe et de son moteur, la suppression de tous ces éléments permet de diminuer le coût de la machine. L'utilisation d'une huile biodégradable, qui se révèle contraignante et nécessaire, peut ainsi être évitée.

Dans le cadre d'une future certification CE de l'hydrolienne, la sécurité doit être revue grâce à une analyse de risques et des solutions apportées pour garantir la sécurité de l'utilisateur.

4.2. Améliorations hydrauliques

Bien que la simulation ait été confirmée au niveau hydraulique, certains aspects restent perfectibles. Ainsi, dès que la hauteur d'eau en amont de la machine augmente ou diminue, le triangle des vitesses est modifié. La conséquence de ce changement doit être étudiée dans le cadre de production de nouvelles hydroliennes.

L'étanchéité de la machine est un point à améliorer afin d'éliminer les entrées d'eau parasites ainsi que les fuites éventuelles autour de la machine.

4.3. Améliorations électriques

Le variateur de fréquence est une solution de compromis. Le couple générateur asynchrone / variateur permet de réduire fortement le coût du système de couplage. Néanmoins des recherches sur d'autres systèmes (génératrice à courant continu / onduleur) sont à mener afin d'évaluer au mieux les solutions possibles en comparant leurs performances et leur prix.

La réception par un organisme agréé est bien entendu à réaliser pour la mise en conformité de l'armoie électrique ainsi que de tout le système y attendant.

4.4. Améliorations électroniques

L'instrumentation de l'hydrolienne est une amélioration majeure quant aux informations pouvant être obtenues. Les différentes vitesses de rotation (roue et générateur) permettent de vérifier le glissement (électrique et transmission). La puissance peut être optimisée en fonction des différents paramètres donnés (hauteur d'eau, hauteur de levée de vanne et fréquence). La gestion de la production avec un rapatriement de données (puissance et production) permet d'évaluer à longue durée la production de l'hydrolienne, mais également de signaler un problème (alarme) si la production s'arrête.

5. Conclusion

5.1. Prototype

Mécaniquement parlant, le prototype a montré que toute la partie mobile n'appelle aucun commentaire (raideur de la roue, support de roue, etc.).

Par contre les éléments perfectibles, mis en évidence, sont :

- la raideur de la cage treillis,
- l'entraînement primaire,
- l'étanchéité à l'eau (lorsque le niveau d'eau est trop important),
- la gestion de la poussée hydraulique générée sur la machine.

5.2. Aspect hydraulique

L'hypothèse théorique de départ, basée sur la théorie établie par M. Poncelet (ratio entre la vitesse de l'eau et vitesse de rotation de la roue de 0,55) n'est pas vérifiée. Le triangle des vitesses n'est donc pas vérifié. Un contrôle de la forme des aubes s'impose.

5.3. Période de tests

Elle s'est avérée nettement trop courte. Actuellement, pour des raisons administratives, l'hydrolienne a dû être sortie de l'eau. C'est l'occasion d'améliorer le prototype. Une nouvelle campagne de validation est planifiée.

5.4. Aspects électrique et électronique

Il apparaît que le couple alternateur asynchrone (machine à bas prix et robuste) et variateur de fréquence offre le compromis technique et économique le plus acceptable.

Dans certaines situations, il peut s'avérer très judicieux que l'hydrolienne entraîne une génératrice couplée sur un onduleur, lui-même raccordé à une batterie de panneaux photovoltaïques. Des économies substantielles seraient réalisables dans ces conditions, de même qu'une stabilité de production. Cette configuration n'a pas pu être testée pour l'instant.

5.5. Suite du projet

Une optimisation du prototype s'avère nécessaire, mais doit faire également l'objet d'un appel de fonds, car difficile à financer sur fonds propres.

Un stress test doit être également initié le plus rapidement possible mais il nécessite un site propre.

Nonobstant ces éléments purement mécaniques, il restera à résoudre la problématique administrative car il est exclu de pouvoir commercialiser la machine sans aider l'utilisateur-client à obtenir toutes les autorisations nécessaires à l'exploitation de l'hydrolienne.

6. Sources

- [1] BOCQUET, J. A., *Mécanique appliquée*, Paris, Librairie polytechnique, Ch. Béranger Éditeur, 1909, pp. 232-237.
- [2] DELAHARE, *Notes et formules de l'ingénieur*, 1916, pp. 698-701.
- [3] D'HERNONCOURT, J. *et al.*, (mis en ligne le 17 février 2014) *Vade-mecum non-technologique du candidat à la réhabilitation d'un site hydroénergétique*
Adresse URL : <http://energie.wallonie.be/fr/vade-mecum-non-technologique-du-candidat-a-la-rehabilitation-d-un-site-hydroenergetique.html?IDC=6175&IDD=11621>
- [4] DIDION, *Études sur le tracé des roues hydrauliques à aubes courbes de M. le général Poncelet*, Paris, Imprimerie nationale, 1870.
- [5] MOULAN, P., *Cours de mécanique élémentaire à l'usage des écoles industrielles*, Paris, Librairie polytechnique, Ch. Béranger Éditeur, 1901, pp. 1213-1218.

7. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Pascal Legrand de CIEX srl pour ses idées, le projet et son financement, ainsi que son aimable autorisation pour cette publication.