



## Micro production d'énergie en rivière Microcentrale et moulin bateau

Présenté par : Emmanuel Biard

A : M. Jean-Pierre Berton



# Remerciements

Je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de ce mémoire, en me fournissant des documents et les ressources bibliographiques. Je remercie particulièrement M.Jean-Pierre BERTON et Mme Catherine BOISNEAU, pour leurs conseils rassurants qu'ils m'ont apporté au cours de la présentation orale sur l'état d'avancement de mon projet, ainsi que M.Manuel Gerard pour sa gentillesse et sa disponibilité, M.Pierre Gaçon pour les documents fournis sur les seuils ainsi que M. Guillaume Gentilhomme et Mlle.Vanessa Calixte pour leurs conseils sur la façon de calculer de capacité de production d'énergie d'un moulin bateau. Je remercie également M.Cussonneau des archives départementales du Maine et Loire qui m'a accordé de son temps pour me transmettre son savoir sur les moulins flottants. Il est nécessaire de remercier Mme Fanny Touze et Mme Isabelle Sacchetti pour leur disponibilité au cours de ces trois années. Je tiens à remercier mes potes qui m'ont soutenu moralement et intellectuellement lors des longues soirées d'hiver et d'ailleurs.

# Préface

Depuis le bois de feu, la traction animale, les moulins crétois et la marine à voile, toutes les sources énergétiques disponibles pour assurer le développement humain ont été renouvelables jusqu'à la *révolution industrielle* du XIX<sup>e</sup> siècle. Celle-ci a précisément été marquée par l'accès massif aux ressources fossiles et non renouvelables (charbon, pétrole, gaz, nucléaire) pendant plus d'un siècle. Chacun sait que cette révolution a profondément bouleversé l'ensemble des activités humaines et a largement contribué à structurer les rapports sociaux, politiques et stratégiques sur l'ensemble de la planète.

Nous atteignons aujourd'hui les limites du modèle de développement productiviste fondé sur deux postulats, dont nous savons aujourd'hui avec certitude qu'il sont faux : celui du caractère inépuisable des ressources énergétiques classiques, et celui de la neutralité environnementale de leur utilisation. En effet, depuis l'explosion de la bombe atomique (1945), la révolution de l'astronautique (années 60), puis les conférences internationales comme celle de Rio en 1992, nous avons pris conscience que nous vivons sur une planète finie. L'être humain peut la détruire ou la sauvegarder. Il peut garder au Nord le gaspillage et laisser au Sud misère et pillage des ressources. Si nous choisissons le développement durable, c'est à dire l'accès équitable aux ressources sans épuisement de la planète, alors une stratégie économe basée sur les énergies renouvelables est indispensable et inéluctable. Ce choix n'est pas seulement une vue de l'esprit pour le long terme, il détermine les conditions de la paix ou de la guerre pour les générations futures.

L'épuisement à terme des ressources fossiles et fissiles, leur impact négatif sur l'environnement ainsi que notre volonté de paix et de justice imposent donc une deuxième *révolution énergétique*. Celle-ci se traduit nécessairement par une application généralisée de l'efficacité énergétique et par un recours massif aux énergies renouvelables : seule la combinaison de ces deux composantes est en mesure de relever ce triple défi. Même si les débats d'experts sont loin d'être clos quant à la proximité et à l'ampleur des échéances, elles n'en sont pas moins inéluctables.

C'est pourquoi la question n'est pas de savoir s'il faut ou non développer cette stratégie, mais bien de savoir comment le faire dans les meilleures conditions et le plus rapidement possible. Ceci est d'autant plus urgent que la France, quatrième puissance industrielle mondiale, doit conquérir toute sa place en ce domaine.

Or cet objectif émerge au sein d'une période historique complexe, marquée à la fois par l'explosion des nouvelles technologies (dont celles du secteur de l'énergie) et de la dématérialisation d'une partie de l'économie, le recul des modes traditionnels d'intervention de l'Etat, une demande sociale souvent contradictoire entre liberté individuelle et sécurité collective, ainsi que l'évidence de la dimension européenne sous-jacente à toute décision politique nationale.

Dans ce contexte, la définition et la mise en œuvre de la stratégie " efficace et renouvelable " procède concrètement de la redéfinition du rôle de l'Etat comme garant de la détermination et de la poursuite des objectifs d'intérêt général. Le hasard du calendrier veut que des échéances essentielles en matière de politique énergétique se profilent sur l'agenda gouvernemental.

En Europe, il apparaît que quelques pays de l'Union (Allemagne, Espagne, Danemark par exemple) empruntent aujourd'hui la voie d'une stratégie énergétique plus conforme au développement durable. Bien qu'aucun de ces pays ne réunisse toutes les conditions de la stratégie d'une efficacité, les décisions politiques et l'effort industriel persévérant démontrent la faisabilité de cette stratégie et interpellent la France alors que celle-ci devra bientôt redéfinir sa propre politique énergétique.

Les énergies renouvelables arrivent en tête des politiques citées par la plupart des gouvernements pour se conformer au protocole de Kyoto. Lorsque plusieurs provinces autonomes espagnoles et même un état européen - le Danemark - affichent des objectifs à vingt ans de plus de 50% de leur électricité issue de sources d'énergie renouvelables, peut-on encore les négliger.

Quant à l'utilisation efficace de l'énergie, elle a économisé dans les pays de l'OCDE depuis les années 70 cinq fois plus d'énergie que toute la production du nucléaire dans ces pays. Peut-on encore ne consacrer à l'efficacité énergétique qu'un quarantième des moyens accordés au nucléaire quand ce dernier est en déclin partout dans le monde ?

*" Cette situation doit donc nous inciter à accentuer – au niveau mondial – nos programmes en faveur des économies d'énergie et de la promotion des énergies alternatives. Pour la France, et à la suggestion de Madame Dominique Voynet, je souhaite que soit mis sur pied avant la fin de cette année un Plan d'économies d'énergie qui touche l'ensemble des secteurs d'activité " (Lionel Jospin, Lyon, 11 septembre 2000).*

Yves Cochet, 2000.

# SOMMAIRE

RESUME.....	p.2
SUMMARY.....	p.3
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	p.4
INTRODUCTION.....	p.5

## **1. L'ENERGIE MICROHYDRAULIQUE** .....p.6

<b><u>1.1. Qu'est-ce que l'énergie hydraulique ?</u></b> .....	p.6
A) Définition.....	p.6
B) Historique.....	p.6
<b><u>1.2. L'énergie hydraulique des microcentrales dans quel but ?</u></b> .....	p.9
<b><u>1.3. Le fonctionnement et les caractéristiques d'une microcentrale</u></b> .....	p.10
A) Définition.....	p.10
B) Fonctionnement.....	p.11
<b><u>1.4. Procédure d'implantation d'une microcentrale</u></b> .....	p.13
<b><u>1.5. Coût d'installation d'une microcentrale</u></b> .....	p.16
<b><u>1.6. Inventaire des équipements hydroélectriques sur le bassin de la Loire</u></b> .....	p.17
<b><u>1.7. Bilan en Europe de la petite hydroélectricité</u></b> .....	p.19
<b><u>1.8. Objectifs en Europe</u></b> .....	p.21
<b><u>1.9. Avantages, limites et inconvénients</u></b> .....	p.21

## **2. DU MOULIN-BATEAU A LA PRODUCTION D'ENERGIE**

<b><u>2.1. Historique</u></b> .....	p.25
A) Naissance des Moulins bateaux.....	p.25
B) Devenir des moulins flottants au cours des siècles en France et en Europe.....	p.26
1) En France.....	p.26
2) En Europe.....	p.27
3) Une Disparition annoncée.....	p.28
4) Aujourd'hui.....	p.28
<b><u>2.2. Principe de fonctionnement d'un moulin bateau</u></b> .....	p.30
<b><u>2.3. Calcul de la capacité énergétique d'un moulin bateau</u></b> .....	p.32
A) Méthodologie.....	p.32
B) Résultats.....	p.34
<b><u>2.4. Comparaison énergétique avec l'éolien</u></b> .....	p.34

CONCLUSION.....	p.38
BIBLIOGRAPHIE.....	p.39
TABLE DES MATIERES.....	p.40
ANNEXES.....	p.41

# RESUME

La micro production d'énergie en France est assurée par les microcentrales hydroélectriques. Cependant cette production d'énergie pose beaucoup de problèmes. En effet cette production d'énergie nécessite une hauteur de chute d'eau suffisante c.-à-d. une énergie hydraulique assez importante pour permettre la mise en action de la turbine, ainsi la présence de seuil est nécessaire. Mais les seuils ont une action nocive sur la faune et la flore aquatique. En effet les seuils perturbent l'écoulement et ainsi perturbent les habitats aquatiques, l'avalaison et la dévalaison des poissons migrateurs comme les saumons atlantiques, l'anguille, et la truite. Pour faire face à ces problèmes et retrouver l'état original des rivières nous pouvons utiliser les moulins flottants donc une microcentrale hydroélectrique flottante.

Les moulins flottants ont été inventés en 537 à Rome par Bélisaire. Rome assiégé par Vitigès, roi de Goths est parvenu à couper les quatre aqueducs qui apportent l'eau nécessaire à la ville pour son alimentation en eau potable et le fonctionnement de ses moulins à eau. Ainsi le moulin flottant fut inventé des besoins de la guerre et du mariage du bateau et des moulins. L'idée est astucieuse les bateaux sont immobilisés dans le courant ; entre eux tournent les roues qui transmettent leur mouvement aux meules qu'ils abritent. Comme les moulins traditionnels, les moulins flottants ont été inventés pour moudre le grain afin de faire du pain. Mais ces moulins flottants ont disparu pendant le siècle XIX parce qu'ils obstruent la navigation des bateaux marchands ! Cet argument s'accroît au cours des siècles parce que le commerce de fluvial intensifie et les moulins flottants sont considérés comme des moyens de productions archaïques. Mais aujourd'hui les moulins flottants sont peut être une solution pour la production d'énergie en rivière.

## **Mots Clés**

Microcentrale, chute, seuil, moulin flottant, moudre, énergie hydraulique, avalaison, dévalaison, les habitats aquatiques, la faune et la flore aquatique.

# SUMMARY

Micro production of energy in France is ensuring by hydroelectric micro power station. However this production of energy poses many problems. Indeed to allow the production of energy one needs height drop enough i.e. a hydraulic energy enough to allow the actuation of the turbine, thus presence of weir is necessary. But weirs have harmful action on aquatic faunas and flora. Indeed thresholds disturb flow thus disturb aquatic habitats disturb upstream and downstream migration of migrating fish like Atlantic salmon, eel, and trout. To face these problems and find original state of rivers we can make floating mills so “floating hydro-generator”.

Floating mills were invented in 537ad in Roma by Bélisaire. Rome besieged by Vitigès, king of Goths, who managed to cut the four aqueducts which brought water necessary to the city for its drinking water supply and the operation of its water mills. Thus the floating mill was born from the needs of war and the marriages of the boat and the mills. Idea is clever boats are immobilized in full current; between them turn wheels which transmit their movement to the grinding stones that they shelter. Like traditional mills, floating mills were invented for grinding grain in order to make bread.

But these floating mills disappeared during the XIX century because they obstruct the navigation of the merchant ships! This argument accents during century because the river trade intensify and the floating mill was considered like archaic productions. But today floating mill are maybe a solution for energy production in river.

## **Keys words**

Hydroelectric power station, drop, weir, floating mill, grind, upstream and downstream migration, hydraulic energy, aquatic habitats, aquatic faunas and flora.



# LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

## Liste des figures

Figure 1 : Roue entraînée par l'énergie hydraulique.....p.6

Figure 2 : Les Différents éléments constitutifs d'une microcentrale(ADEME).....p.13

Figure 3 : Carte de localisation des équipements hydroélectriques sur le bassin de La Loire  
(Steinbach-Chupin 2003)... .....p.18

Figure 4 : Typologie sommaire(Claude Rivals, 2000).....p.26

Figure 5 : Quelques moulins bateaux français (Le Chasse marée n°11 1984).....p.27

Figure 6 : Vue du dessus du mécanisme d'un moulin bateau (L Muzeul tehnicii populare, Sibiu,  
1981).....p.30

Figure 7 : Vue de devant et de côté d'un moulin bateau de Reckève Hongrie (Le Chasse marée n°11  
1984)... .....p.31

Figure 8 : Graphique comparant la production d'énergie électrique d'un moulin Bateau en fonction de la  
vitesse du courant et des différentes surfaces de pales... .....p.35

Figure 9 : Les différentes tailles d'éoliennes et leurs capacités énergétiques associées .....p.36

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Détail de la procédure d'autorisation.....p.15-16

Tableau 2 : Puissance hydroélectrique installée pour les 25 Etats membres de l'Union Européenne  
(EurObserv'ER 2005).....p.20

# INTRODUCTION

Ce présent rapport intitulé micro production d'énergie en rivière microcentrale et moulin bateau a pour but d'évaluer la part d'électricité produite en France par des petites installations hydroélectriques et d'essayer de trouver une alternative aux microcentrales de nos rivières qui portent un certain nombre d'atteintes à l'écosystème aquatique, en redécouvrant une ancienne technique d'utilisation de l'énergie hydraulique, les moulins bateaux.

L'énergie hydraulique est une énergie naturelle et renouvelable participant au développement durable ; elle n'émet pas de gaz à effet de serre, c'est l'énergie renouvelable la mieux maîtrisée et son coût de production est très bas ce qui en fait l'énergie renouvelable la plus compétitive. En France, 10 % de l'électricité est produite à partir des énergies renouvelables, en particulier l'énergie hydraulique. Avec près de 70 Tonne Watt heure produite en 2002, EDF est l'un des plus importants producteurs d'énergies renouvelables en Europe.

Les accords de Kyoto ont imposé des objectifs contraignants en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Pour 2008-2012, l'Union Européenne doit diminuer ses émissions de 8% par rapport à 1990. D'ici 2010, la France a pour objectif que les énergies renouvelables représentent 21% de la consommation française et l'Europe 22% de la consommation européenne.

Cependant EDF exploite un important parc de production hydraulique et le territoire français est équipé à plus de 90 % de son potentiel. Il faut donc absolument trouver un nouveau mode d'utilisation de l'énergie hydraulique afin d'atteindre les objectifs envisagés.

Dans une première partie nous verrons ce qu'est l'énergie hydraulique, son développement et son utilisation au cours des siècles. Puis nous verrons comment fonctionne une microcentrale et ses conditions d'implantation au regard de la législation française. Ensuite nous verrons le bilan de l'énergie hydraulique en France et en Europe, ses objectifs puis ses avantages et ses inconvénients.

Dans la seconde partie nous verrons ce qu'est un moulin bateau, son fonctionnement, son utilisation au cours des siècles en France et en Europe puis les motifs de sa disparition. Puis nous tenterons de calculer la capacité de production d'énergie d'un moulin bateau et on le comparera à la capacité de production d'énergie d'une éolienne.

# 1. L'ENERGIE HYDRAULIQUE

## 1.1. Qu'est-ce que l'énergie hydraulique ?

### A) Définition

L'énergie hydraulique résulte du mouvement de masses d'eau coulant le long des pentes naturelles. Lorsque le mouvement est capté par une roue hydraulique il peut être transformé en travail utile, par exemple en électricité grâce au mouvement d'un alternateur. (Cf. figure1p6)

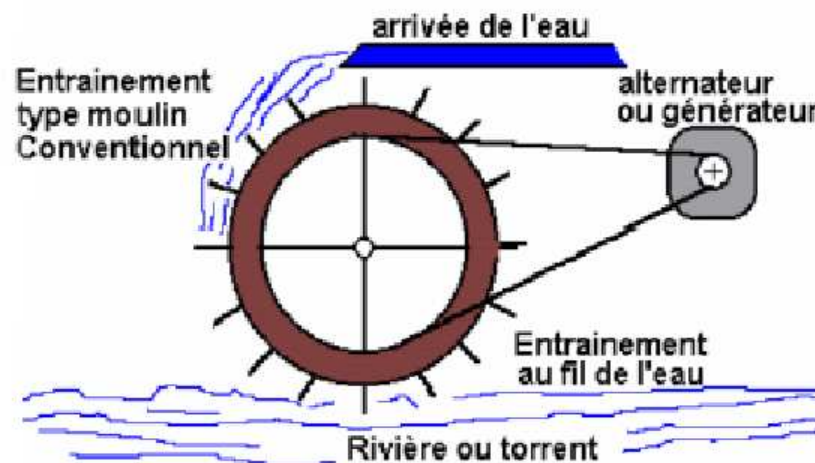


Figure 1 : Roue entraînée par l'énergie hydraulique

### B) Historique

L'ordre d'apparition des machines hydrauliques fut le suivant : la roue à palettes, la roue horizontale, la roue verticale avec engrenages (la roue en dessous, la roue de côté et la roue en dessus), les moulins flottants, les moulins à marée, puis les turbines.

**La roue à palettes:** cette roue dont le périmètre est garni de palettes et godets servait à élever l'eau, les palettes plongeant dans la rivière permettant le mouvement de la roue.

**La roue horizontale:** Depuis longtemps on connaît l'usage des petits moulins à eau à roues horizontales à palettes mais on ne sait pas dater exactement son apparition.

Cette roue, entièrement immergée dans la rivière, est fixée à un arbre vertical avec, à l'autre extrémité, une meule. Ces moulins étaient, donc, exclusivement, dédiés à la mouture de grains.

**La roue verticale:** Ce n'est qu'au premier siècle de notre ère que dans son livre d'architecture, Vitruve décrit le moulin à eau à roue verticale, beaucoup plus efficace et l'appelle "hydraulète" ce qui laisse penser à une origine grecque, peut-être de la Grèce d'Asie. Il se serait alors diffusé vers l'occident mais aussi vers l'orient, car des moulins ont été retrouvés en Chine.

Le premier engrenage vient d'être mis au point pour transmettre le mouvement du plan vertical, assuré par la rotation de la roue ; au plan horizontal (rotation de la meule). C'est le couple rouet-lanterne qui a au moins deux mille ans d'avenir.

Cependant ce processus révolutionnaire n'emporte pas l'adhésion de la majorité.

En effet que deviendrait la multitude d'esclaves ? Ne présentant guère d'utilité leur nombre resta faible et La diffusion des moulins à eau est assez lente, aussi bien en Italie qu'en Gaule. On trouve cependant à Barbegal, près d'Arles, un ensemble de 8 moulins échelonnés de part et d'autre d'une chute d'eau alimentée par un aqueduc, ceci vers la fin du II<sup>e</sup> ou au III<sup>e</sup> siècle après JC.

L'eau était captée dans l'Arcoule par un aqueduc de 2 m de largeur et 5,6 m de profondeur. A Barbegal, l'aqueduc est incliné à 30 degrés. Chaque roue entraînant une paire de meules, on a estimé la production de 2,8 tonnes de farines par jour, la plus grande partie embarquée dans le port d'Arles et exportée vers Rome.

Ce n'est que vers le milieu du 4<sup>e</sup> siècle que plusieurs moulins furent édifiés à Rome. Les moulins de Janicule étaient alimentés par une déviation de l'aqueduc de Trajan et devinrent vite indispensables pour la nourriture de la population. Les villes romaines furent par la suite progressivement équipées de moulins à eau vers le IV<sup>e</sup> et le VI<sup>e</sup> siècle. Aux Xe, XI<sup>e</sup>, et XII<sup>e</sup> siècles, de nombreuses industries vont utiliser l'énergie hydraulique : fabrication de poudres, meunerie, brasserie, huilerie, décorticage du riz mais aussi irrigation.

L'Invention de l'arbre à cames au Moyen Age (XIII<sup>e</sup> siècle) permet aux roues hydrauliques d'actionner d'autres machines que les meules et mécaniser les manufactures. La came va permettre d'écraser mécaniquement le chanvre (matière première du papier et textile), fouler les draps, marteler le fer, scier les grumes, broyer les minéraux, actionner des soufflets,... En 1086 le grand cadastre dans le Domesday Book (Livre du Jugement Dernier) recense 5624 moulins en Angleterre, soit, selon Lewis Mumford, un moulin pour 400 habitants.

En 1276 les premières mentions de moulins à papier mus par l'énergie hydraulique à Fabriano. D'autres sont en fonctionnement en 1280 à Xativa (Valencia, E). Vers 1300, ils apparaissent en France. Le moulin Richard-de-Basdate de 1326. En 1848 en France, on dénombre 22 500 moulins à eau (dont 17 300 pour le blé) contre 5 200 machines à vapeur. Au début du 20<sup>e</sup> siècle l'introduction, en Afrique orientale, de moulins par les coolies indiens venus construire le chemin de fer de Mombassa en Ouganda.

Malgré un rendement très faible (un demi CV, soit entre 3 et 400 W), les roues hydrauliques furent utilisées pendant près de deux millénaires.

**Les moulins flottants:** ils auraient été inventés, en 537, lors du siège de Rome par les Goths. Ceux-ci ayant coupé l'alimentation en eau par les aqueducs et presque tous les moulins romains étant mus par l'eau des aqueducs, le défenseur de la ville, le général byzantin Bélisaire, imagina d'installer des moulins à roues à aubes sur le Tibre, pour assurer l'alimentation de farine de la ville. (Nous reviendront dans la seconde partie sur un historique plus détailler)

**Les moulins à marée:** on en construisit un, en 1130, près de l'embouchure de l'Adour (F). Un siècle plus tard, on en vit plusieurs près de Venezia. Ce n'est qu'au 20<sup>e</sup> siècle que l'énergie marémotrice sera utilisée industriellement avec la centrale de l'estuaire de la Rance (Bretagne).

Mais ce n'est qu'appartenir de l'invention des turbines que suivent celles des microcentrales.

**Les turbines hydrauliques:**

**La turbine Fourneyron:** En France, en 1826, l'ingénieur Benoît Fourneyron

**La turbine Francis:**

Turbine où la roue intérieure est mobile. Ce système proposé par le Français Jean Poncelet fin des années 1820, fut breveté par le Nord-américain Samuel B. Howd en 1838 et popularisé par James B. Francis. Dans les années 1860, cette turbine commença à supplanter la roue hydraulique.

**La turbine Pelton:** Conçue par l'ingénieur des mines en Californie, Lester A. Pelton, dans les années 1870.

**La turbine Kaplan:** En 1910, l'Autrichien Victor Kaplan propose une turbine répondant au rendement médiocre de la turbine Francis dans le cas de faibles charges.

### **1.2. L'énergie hydraulique des microcentrales dans quel but ?**

Longtemps négligées, les énergies renouvelables sont en pleine croissance en France. Soutenues par les pouvoirs publics, elles sont appelées à prendre une place significative à côté des énergies fossiles et du nucléaire. L'enjeu est à la fois local et planétaire.

Moulins à eau, bois pour le feu, bateaux à voiles, traction animale... Depuis des millénaires, les énergies renouvelables ont largement contribué au développement des activités humaines. Avec la révolution industrielle, les énergies fossiles - le charbon, puis le pétrole et le gaz -, faciles à stocker et très efficaces, ont peu à peu supplanté les énergies renouvelables, diffuses et pour la plupart irrégulières. Pourtant, à l'orée du XXI<sup>e</sup> siècle, celles-ci suscitent à nouveau l'intérêt. Pour au moins quatre raisons :

-D'abord L'énergie hydraulique c'est énergie renouvelable la plus développée après la biomasse et la mieux maîtrisée, naturelle inépuisable, à l'inverse des énergies fossiles, grâce aux cycles naturels, elle a l'immense avantage d'être présente partout tel que les rayonnements solaires et le vent. Elle participe au développement durable « La terre ne nous appartient pas nous l'empruntons à nos petits enfants » Antoine de Saint Exupéry

En France, 15 % de l'électricité est produite par de grosses installations hydroélectriques. Cependant le territoire français est équipé à plus de 90 % de son potentiel par des grosses installations hydroélectriques c'est pourquoi les microcentrales recèlent encore un fort potentiel en France et en Europe.

-Puis la protection de l'environnement : En effet, à la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables ne produisent pas de gaz à effet de serre et donc ne participe pas au réchauffement climatique et elles ne rejettent aucun déchet dans l'eau. Une centrale de 1 MW évite chaque année l'émission d'environ 5000 t de CO<sub>2</sub> par rapport à une centrale à combustion classique » (Observ'ER).

Elles sont donc au centre du plan de lutte contre l'effet de serre qu'a adopté le gouvernement français en 2000 pour tenter de limiter le réchauffement de la planète.

-Ensuite, la sécurité énergétique : En France, le pétrole couvre 41 % des besoins énergétiques, 37 % revenant à l'électricité. L'approvisionnement en combustibles fossiles est soumis à des aléas géopolitiques. De plus, leur quantité est limitée et porte atteinte à l'environnement. Une diversification s'impose donc pour l'avenir.

-Enfin, l'enjeu économique et le développement local. La libéralisation du marché de l'électricité permet aux sources d'énergies renouvelables d'y prendre leur place. C'est un gisement d'emplois à développer, réparti sur l'ensemble du territoire.

L'hydraulique, énergie de l'eau : c'est l'énergie renouvelable Les cours d'eau sont équipés de turbines reliées à des alternateurs qui convertissent la force de l'eau en électricité. En France, 15 % de l'électricité est produite par de grosses installations hydroélectriques. Les petites installations hydrauliques recèlent encore un fort potentiel en France et en Europe.

### **1.3. L'énergie hydraulique des microcentrales**

#### **A) Définition**

Le terme de microcentrale désigne communément des installations hydroélectriques transformant l'énergie hydraulique en énergie électrique dont la puissance n'excède pas 500 KW. Ce seuil, lié à des considérations administratives ou juridiques. (ADEME)

La micro hydraulique appartient à la famille des énergies renouvelables. La commission européenne, dans sa directive du 27 septembre 2001 traitant de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables, entend ainsi par source d'énergie renouvelable l'énergie hydraulique sans distinction de puissance. C'est pourquoi il est difficile de connaître la part réelle de production d'énergie des microcentrales dans la grande famille de la petite hydraulique comptabilisant les installations électriques dont la puissance n'excède pas 10 MW

## **B) Fonctionnement**

Une microcentrale fonctionne sur le même principe qu'une éolienne, c'est à dire qu'elle convertie l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement en énergie électrique pour ceci il est nécessaire de la concentrer, soit en tirant parti de chutes naturelles, soit par l'aménagement d'un barrage de manière à obtenir une hauteur de chute et un débit suffisant pour installer une centrale. Les Différents Eléments constitutifs d'une microcentrale sont les suivants (cf. figure 2p13) :

- Ouvrage de prise d'eau

La prise d'eau est constituée par une dérivation dont l'entrée est limitée par un seuil et qui dirige le débit ainsi dérivé vers le canal d'amenée. Le contrôle du débit s'effectue le plus souvent, soit par un barrage mobile dans la rivière, soit par une vanne dans le canal d'amenée.

- Canal d'amenée

Il relie la prise d'eau à l'entrée de la centrale. Il est habituellement en écoulement libre à ciel ouvert.

- Vannes batardeaux

Vannes d'isolation généralement rectangulaires, dont le fonctionnement est similaire à celui d'une guillotine, et qui permettent d'isoler la microcentrale de la rivière en cas de nécessité (entretien de l'installation, protection contre les crues,...)

- Grille et dégrilleur

La grille protège la turbine contre les corps charriés par la rivière, tandis que le dégrilleur, sorte de peigne ou de râteau, débarrasse la grille des éléments flottants accumulés.

- Conduite forcée ou chambre de mise en charge

La conduite forcée est un tuyau qui relie l'extrémité du canal d'amenée (au sommet de la pente) à la turbine (au pied de la pente). Elle supporte à son extrémité inférieure une pression de service voisine de la hauteur de chute. Dans certains cas, par exemple les anciennes turbines Francis à axe vertical, la conduite forcée est remplacée par une chambre de mise en charge.

- La turbine

La turbine transforme l'énergie de l'eau en énergie mécanique. La turbine a remplacé la roue à aubes qui était utilisée jusqu'au 19ème siècle dans les moulins à eau. Le rendement d'une turbine (de l'ordre de 70%) est nettement supérieur à celui de la roue hydraulique (20%). Une turbine comprend des organes fixes, des organes de réglage et une partie mobile (roue).



Les organes fixes et de réglage ont pour rôle essentiel de diriger l'eau sur la roue dans les meilleures conditions possibles; la partie mobile est destinée à produire un couple moteur sur l'arbre en transformant en puissance mécanique la plus grande fraction possible de la puissance disponible.

- La régulation de vitesse

La régulation synchronise la vitesse de rotation de la turbine avec l'alternateur. Elle permet aussi le démarrage et l'arrêt de la turbine en actionnant le distributeur.

- L'alternateur

L'alternateur permet de transformer l'énergie mécanique en électricité. Il comporte un induit fixe (stator) et un inducteur tournant (rotor). Les alternateurs peuvent être classifiés suivant l'excitation du rotor. En ce qui concerne l'alternateur synchrone, l'excitation est produite par une petite génératrice annexe qui produit un courant créant un champ magnétique dans le rotor. Dans le cas de l'alternateur asynchrone, la fréquence et le voltage du courant sont imposés par le réseau. Il n'y a pas d'excitation du rotor. Cet alternateur est plus simple et plus robuste mais n'est utilisable que lorsque la puissance de la microcentrale est largement inférieure à la puissance du réseau, c'est-à-dire de la charge, qu'il alimente.

- Réseau de transport et de distribution de l'électricité produit

L'énergie produite peut être autoconsommée par le producteur (éclairage, matériel électrique, chauffage) ou être revendue au réseau.

- Canal de restitution

Ce canal relie la sortie des turbines au lit du cours d'eau aménagé.

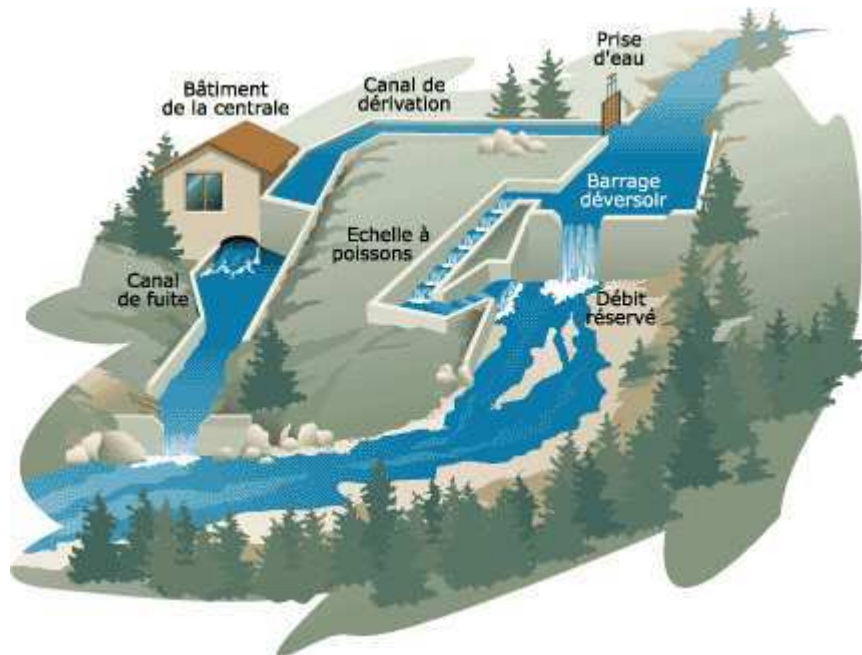


Figure 2 : Les Différents éléments constitutifs d'une microcentrale (ADEME)

#### **1.4. Procédure d'implantation d'une microcentrale**

Les projets des centrales hydroélectriques sont soumis aux prescriptions de la loi du 16 octobre 1919, relatives à l'utilisation de l'énergie hydraulique. Cette loi précise que « nul ne peut disposer de l'énergie des marées, des lacs et cours d'eau sans une concession ou autorisation ». L'appartenance au régime de la concession ou de l'autorisation est déterminée par la puissance maximum brute de la chute (PMB).

Cependant nous ne traiterons pas le régime de la concession car il ne concerne pas la micro hydraulique.

Les principaux textes d'application de cette loi, fixant les procédures dans le domaine de l'hydroélectricité sont :

- pour les ouvrages relevant du régime de la concession (PMB > 4500KW), le décret du 94- 894 du 13 octobre 1994 relatif à la concession et à la déclaration d'utilité publique des ouvrages utilisant l'énergie hydraulique.

- pour les ouvrages relevant du régime de l'autorisation (PMB<4500KW) le décret 93-742 du 29 mars 1993, relatif aux procédures d'autorisation et de déclaration prévues au titre de l'article 10 de la loi sur l'eau n° 92-3 du 3 janvier 1992, modifié par le décret 95-1204 du 6 novembre 1995 relatif à l'autorisation des ouvrages utilisant l'énergie hydraulique.

Dans les deux cas ces procédures sont à compléter par les procédures « énergétiques » prévues par la loi électricité de février 2000 : autorisation ou déclaration de production, certificat de rachat de courant notamment. Toutefois, la loi de février 2000 précitée a prévu que les « titres administratifs délivrés en application de la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique valent autorisation au sens de la présente loi ».

Le décret du 6 novembre 1995, relatif aux projets de chutes hydroélectriques soumis à autorisation porte sur l'autorisation initiale et les modifications ultérieures des centrales autorisées. Les projets doivent respecter les règles de fond de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 (article 10). Les dispositions du décret n°93-742 du 29 mars susvisées leur sont applicables sous réserve des dispositions des articles du décret de 1995 (article 1).

De la même façon, la composition du dossier de demande d'autorisation (Cf. Tableau 1p15-16) est précisée : il est adressé en 7 exemplaires au préfet (article 2 du décret de 1993) et sa composition, détaillée en 17 points, avec des différences selon que la puissance est inférieure ou supérieure à 500 kW, présente les 21 caractéristiques de l'ouvrage (dont le débit maintenu dans la rivière), une étude ou notice d'impact, les mesures compensatoires, des éléments sur la libre disposition des terrains avant mise à l'enquête publique...). En outre, la Loi pêche de 1984 impose de maintenir dans le lit court-circuité d'un cours d'eau aménagé un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces (1/10ème du module pour les nouveaux ouvrages selon l'article L 232.5 du code rural ; et 1/40ème pour les ouvrages existants).

L'obligation de réaliser une étude d'impact, préalable à la réalisation d'ouvrages ou d'aménagements publics ou privés qui, par leurs dimensions ou leurs effets, peuvent porter atteinte au milieu naturel résulte de la loi du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature (décret 77-1141 du 12-10-1977, modifié par le décret 93-245). Depuis 1993, pour les centrales dont la puissance est supérieure à 500 kW, l'étude d'impact est nécessaire lors des renouvellements d'autorisations qui modifient la consistance ou le mode de fonctionnement.

Cette modification concerne aussi les notices d'impact des ouvrages de puissance inférieure à 500 kW.

Le tableau ci après (Tableau 1p15-16) rappelle les principales étapes de la procédure pour les centrales soumises au régime de l'autorisation.

Ce tableau ne détaille que les procédures usuelles qui s'appliquent à tous les projets ou celles qui sont explicitement rappelées par les textes spécifiques à l'hydroélectricité, comme par exemple le cas de projets situés en sites classés ou inscrits. Il ne détaille pas les procédures préalables ou complémentaires qui peuvent dans certains cas particuliers également concerner le projet comme par exemple : l'autorisation de défrichement, l'autorisation en périmètre de monument historique classé, le cas de projets situés dans un parc naturel régional... Ces procédures « complémentaires » peuvent s'appliquer également aux projets éoliens et on se reportera utilement au tableau correspondant.

Enfin le tableau ne traite pas de la procédure à suivre en cas de la présentation simultanée ou en cours de l'instruction de demandes concurrentes, qui est un cas très rare.

Référence du texte	autorité ou organisme concerné	Nature de l'intervention	délai maximum
décret 93	préfet	Accusé de réception du dossier	pas de délai
décret 93	préfet (1)	examen du dossier et délivrance d'un avis de réception de la demande régulière et complète ou demande de complément si dossier incomplet	pas de délai ; dépend de la qualité du dossier présenté
décret 95	préfet (1)	consultation des services de l'Etat intéressés (DIREN, DRIRE, SDA, DDE ou DDAF, SN...)	30 jours au plus après l'avis de réception de la demande complète
décret 95	services de l'Etat (DIREN, DRIRE, SDA, DDE ou DDAF, SN...)	avis sur le dossier	2 mois à compter réception (réputé favorable en l'absence)
décret 95	préfet	rejet motivé ou mise à l'enquête	pas de délai pour prendre la décision
<b>arrêté de rejet ou de mise à l'enquête du projet</b>			
décret 93	Préfet	met à l'enquête et fait les consultations	45 jours pour l'enquête
décret 93	Commissaire enquêteur	rapport et avis sur la demande	45 jours pour rendre son avis à compter de la clôture
décret 93	Commune	Avis sur le projet	15 jours au plus tard après clôture de l'enquête
décret 95	Conseil général	Avis sur le projet et sur les réserves en eau et en force à lui attribuer pour les chutes de PMB>500KW	2 mois à compter de l'ouverture de l'enquête
décret 93	gestionnaire du domaine public	Avis	45 jours à compter de réception
loi du 02/05/30 sur les sites classés ou inscrits	ministre ou préfet pour site classé	en site classé délivrance du permis de construire par le ministre (MATE) ou d'une autorisation de travaux par le préfet après avis SDAP, DIREN et commission des sites ; en site inscrit le PC est délivré par l'autorité compétente après avis SDAP, DIEN, commission des sites	pas de délai pour la délivrance du PC par le ministre.

décret 93	CDH	avis en séance au vu du rapport du service instructeur	pas de délai de saisine
décret 93/95	Préfet	statue sur la demande	6 mois après date d'ouverture de l'enquête (8 en cas de demandes concurrentes) sauf si projet en site classé
<b>délivrance de l'arrêté d'autorisation au titre lois sur l'eau et sur l'hydroélectricité</b>			
décret 93/95	services	avis sur les plans d'exécution	2 mois à compter réception des plans
Code de l'urbanisme	préfet(DDE)	avis sur demande de permis de construire	2 mois à dater du dépôt de la demande
<b>délivrance ou notification de refus du permis de construire</b>			
décret 95	préfet (1)	visa des plans après avis des services et avant début des travaux	pas de délai
décret 95	préfet (1)	récolement avant mise en service	pas de délai
<b>délivrance de l'autorisation d'exploitation de la chute</b>			
décret du 7/09/2000 (2)	ministre chargé de l'énergie (2)	délivrance de du récépissé de déclaration d'exploiter (2)	dès réception du dossier complet (2) peut en retirer le bénéfice dans les 2 mois suivant la délivrance
loi de février 2000	préfet sur instruction DRIRE	certificat d'obligation d'achat	pas de délai

**Tableau 1** : Détail de la procédure d'autorisation

*Décret 93 : décret n° 93-742 du 29 mars 1993 relatif aux procédures d'autorisation et de déclaration au titre de la loi sur l'eau*

*Décret 95 : décret n° 95-1204 du 6 novembre 1995 relatif à l'autorisation des ouvrages utilisant l'énergie hydraulique et modifiant le décret du 29 mars 1993*

*(1) en principe il s'agit non pas du préfet mais du service instructeur désigné par le préfet (service de police des eaux) qui a reçu délégation pour conduire cette partie de la procédure*

*(2) citée pour mémoire ; dans le cas de centrales hydroélectrique, l'autorisation délivrée au titre de la loi du 16 octobre 1919 et de la loi sur l'eau vaut déclaration au titre de la loi de février 2000.*

### **1.5. Coût d'une installation hydroélectrique.**

Le coût d'une microcentrale peut varier considérablement selon les caractéristiques de l'équipement, la configuration du terrain ou la puissance et la tension désirée.

Mais le savoir-faire et les technologies éprouvées dans le domaine de l'hydroélectricité garantissent une installation efficace et pérenne: la turbine et le générateur sont conçus pour fonctionner une quarantaine d'années sans remplacement ni intervention importante ; le génie civil, s'il est bien conçu et réalisé, peut durer au-delà de cent ans. Et il faut rappeler que la production hydroélectrique se fait à partir d'une énergie gratuite et renouvelable.

Ainsi on peut s'attendre à des temps de retour d'investissement d'une dizaine d'années ce qui est tout à fait satisfaisant.

### **Le coût des petites centrales**

Si on prend l'exemple d'une centrale de basse chute (5 m de dénivelé, débit de 550 l/s) d'une puissance de 20 kW équipant une ferme, l'installation coûte entre **30 000 et 90 000 €** (EDF)

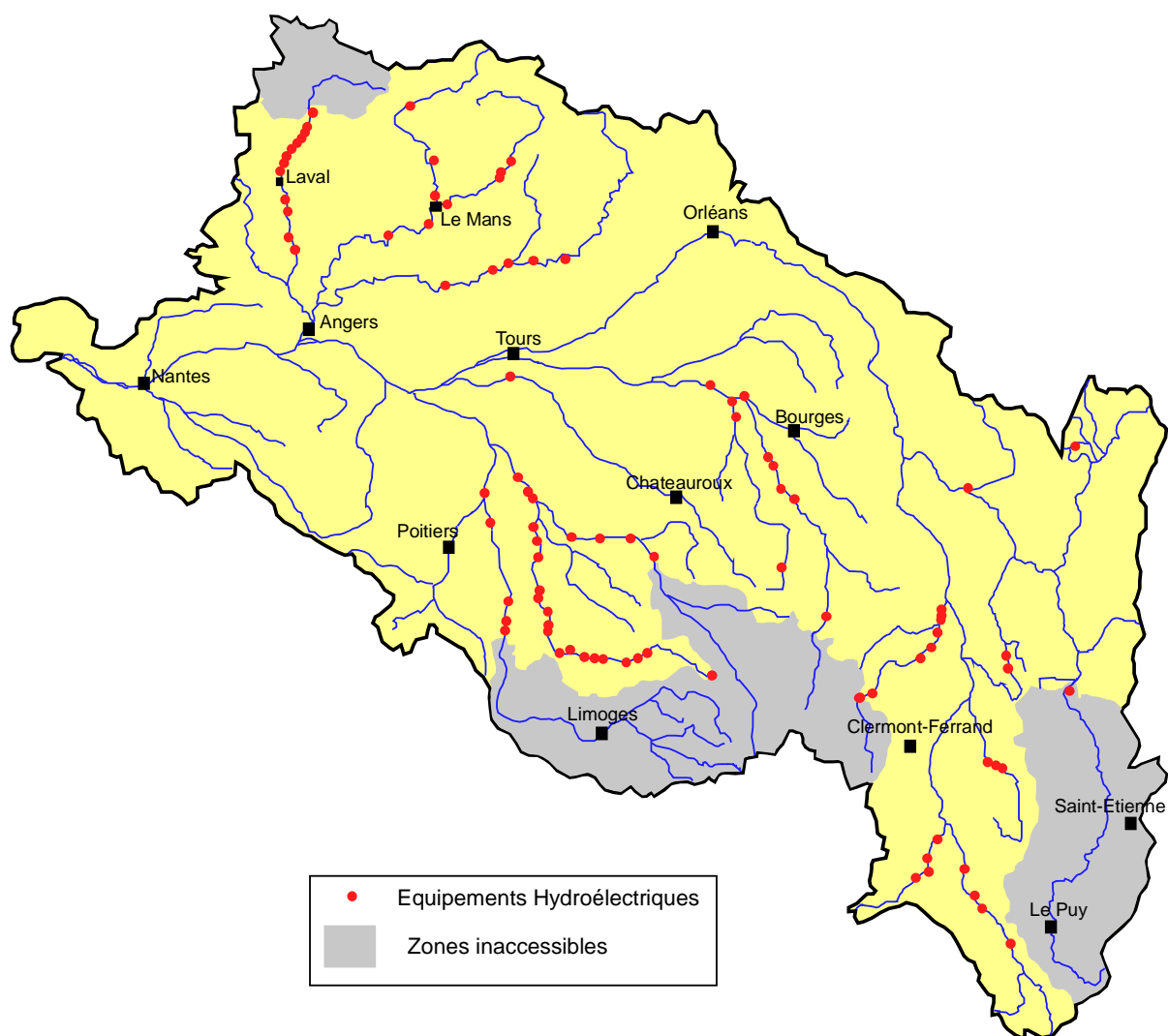
### **Une pico centrale de haute chute**

(100 m de dénivelé, débit de 2,5 l/s) de 2 kW équipant un refuge coûte entre **5 000 et 15 000€**, auxquels il faut rajouter le coût des études environnementales, qui peuvent faire doubler le prix de l'installation. (EDF)

## **1.6. Inventaire des équipements hydroélectriques sur le bassin de la Loire**

Actuellement 1038 seuils sont recensés sur le réseau hydrographique de la Loire. Le réseau pris en compte correspond à tous les axes principaux de migration qui ouvrent accès à plus de 1000 km<sup>2</sup> de bassin versant. Le travail de repérage n'est pas encore terminé sur certains axes mais l'essentiel des ouvrages est recensé.

Au total 119 équipements hydroélectriques (Cf. Figure 3p18) sont actuellement recensés sur le réseau du bassin versant de la Loire ce qui représentent 11% des seuils recensés. Les puissances d'équipement et les risques d'impact sont très variables entre les usines hydroélectriques de plusieurs dizaines de MW et la petite turbine fonctionnant pour la consommation propre d'un propriétaire de moulin. En terme d'impact sur l'écosystème, il est important avant tout de connaître l'importance relative du débit qui passe dans les turbines par rapport au débit de la rivière la hauteur du seuil. L'indicateur retenu en la matière est constitué par le rapport entre débit d'équipement de l'installation et module de la rivière.



**Figure 3** : Carte de localisation des équipements hydroélectriques sur le bassin de La Loire (Steinbach-Chupin 2003)

Cependant l'impact des ouvrages hydroélectriques doit être relativisé à l'échelle du bassin. En effet, on observe que les ouvrages hydroélectriques ne touchent pas les zones aval, mais plutôt les zones amont.

### **1.7. Bilan en Europe de la petite hydroélectricité.**

Il est nécessaire de rappeler que la commission européenne, dans sa directive du 27 septembre 2001 traitant de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables, entend ainsi par source d'énergie renouvelable l'énergie hydraulique sans distinction de puissance. Il est donc difficile de trouver des données assez pertinentes sur la part de la micro hydraulique (<500KW) en France et en Europe d'autant plus que dans la grande majorité des cas la production d'électricité via les microcentrales est faite par des producteurs indépendants publics ou privés (particuliers ou collectivités locales) qui produisent l'énergie pour leur propre consommation et revendent le surplus à EDF.

Cependant il est intéressant de se rendre compte des puissances installées en petites hydrauliques et de leurs perspectives de développements.

Le secteur d'énergie hydraulique couvre différentes réalités. La gamme des capacités est particulièrement large, allant de quelques kilowatts jusqu'à plusieurs gigawatts, d'une consommation du ménage jusqu'à l'équivalent de la petite échelle nucléaire de plusieurs réacteurs. Le petit hydraulique est définie par des installations ayant des capacités moins de 10 MW. Mais certains pays continuent à employer des seuils différents (entre 5 MW et 25 MW) dans leur comptabilité. Idéal pour l'électrification des emplacements d'isolés, la petite hydraulique fournit également une contribution supplémentaire à la production électrique nationale dans le cas des crêtes de consommation. À la différence des autres secteurs, l'énergie hydraulique dépend fortement de la géographie d'un pays de cette manière, plus de 80% de la capacité hydraulique est installé dans 5 pays : L'Italie, La France, L'Espagne, L'Allemagne et La Suède.

La capacité totale de fonctionnement est estimée à 11 597.9 MW pour 25 membres de l'Union Européenne. L'Italie avec 2 360 MW et la France avec 2 021 MW sont les deux pays mieux équipés dans les installations hydrauliques (cf. tableau 2p20). Pendant les dernières années, les capacités installées ont très peu évolué, malgré un vrai potentiel, tous les nouveaux projets sont soulevés par des procédures administratives complexes et des barrières de normalisation presque systématiques. À d'autres égards, il y a un potentiel fort pour la réadaptation et la combinaison des emplacements existants permettant d'augmenter la capacité de production. Plus de deux tiers des installations actuelles ont plus de 40 ans et devront donc subir des modifications.



On devrait noter cependant que les taux de croissance de ce secteur dans les dix nouveaux pays de l'union européenne est plus élevé que ceux des 15 plus anciens membres l'UE. C'est particulièrement dû à la Pologne, qui a augmenté sa capacité de plus de 17% entre 2003 et 2004.

Pays	2003	2004	Croissance en %
Italie	2330	2360	1,30%
France	2020	2021	0%
Espagne	1704	1750	2,70%
Allemagne	1544	1565	1,40%
Suède	1100	1105	0,50%
Autriche	918	950	3,50%
Finlande	370	370	0%
Portugal	301	320	6,30%
Pologne	243	285	17,30%
République Tchèque	261,5	271,7	3,90%
Angleterre	161	162,3	3,90%
Slovénie	84,5	85,4	1,10%
République Slovaque	70	71	1,40%
Grèce	44,5	70	57,30%
Belgique	63,5	64	0,80%
Luxembourg	40	40	0%
Irlande	33,4	38,1	14,10%
Lettonie	25	25	0%
Lituanie	19	19	0%
Danemark	11	11	0%
Hongrie	8,4	8,4	0%
Estonie	4	4	0%
Hollande	2	2	0%
Chypre	0	0	0%
Malte	0	0	0%
Totale U.E 25	11357,8	11597,9	2,10%

Tableau 2 : Puissance hydroélectrique installée pour les 25 Etats membres de l'Union Européenne (EurObserv'ER 2005)

Remarque : Il est difficile voir quasi impossible de connaître l'état des installations hydroélectriques aussi bien du point de vue économique, que productif. En effet en ce qui concerne la France, EDF ne dévoile pas ces informations afin, je pense, de ne pas subir des pressions pour la destruction de telle ou telle installation jugée peu rentable, vétuste etc. par rapport aux atteintes qu'elles peuvent porter à l'environnement.

### **1.8. Objectifs en Europe**

Malgré le nouvel élan apporté par les nouveaux pays membres au dynamisme de ce secteur, l'Europe ne pourra néanmoins pas atteindre l'objectif de 14000 MW capacité installée en 2010. Le taux de croissance annuel moyen est de 2% pour l'UE des 25 membres ce qui apportera l'Union européenne jusqu'à approximativement 13 140 MW en 2010. En outre, l'objectif de la campagne "Energie durable pour l'Europe" qui vise 2 000 MW de nouvelles installations dans l'Union Européenne des 25 membres pour 2006 sera également très difficile sans détermination politique forte pour soulever les barrières administratives et créer un environnement de normalisation favorable dans ce secteur, l'inexploitation reste un risque potentiel pour l'avenir.

### **1.9. Avantages, limites et inconvénients**

#### **Les avantages:**

- La technologie des microcentrales hydroélectriques est très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables.
- L'équipement est caractérisé par sa grande robustesse, sa fiabilité et sa longue durée de vie (environ 40 ans).
- L'entretien de l'installation est très simple et les frais de fonctionnement sont réduits (quelque % de l'investissement).
- Il s'agit bien entendu d'une énergie propre dans ce sens qu'elle ne génère, directement, aucune émission nocive et ne nécessite aucun transport.

#### **Les limites:**

- La production d'électricité d'une microcentrale est parfois caractérisée par des fluctuations importantes suite à la grande variabilité des débits de certains sites.
- Les coûts d'investissement peuvent être assez importants pour certaines installations.
- L'installation d'une microcentrale hydroélectrique nécessite des sites appropriés (cours d'eau et chute)

## **Les inconvénients** : impacts sur l'environnement

Une microcentrale mal intégrée dans son environnement, peut générer des perturbations de diverses natures.

- L'atteinte au paysage par l'aspect peu esthétique de la centrale, de la prise d'eau et de la conduite forcée.
- Le bruit généré par les turbines, le multiplicateur de vitesse, l'alternateur, du transformateur et l'écoulement de l'eau peut provoquer une gêne pour le voisinage proche.
- La prise d'eau peut entraîner une perturbation du régime de l'eau et de la relation nappe aquifère - rivière.
  - Décharge brusque de la nappe vers le cours d'eau à la décrue.
  - Augmentation des profondeurs d'eau et une réduction des vitesses.
  - Modification globale des faciès d'écoulement.
  - Augmentation du temps de transfert de l'eau ce qui modifie la cinétique des processus d'épuration (AUSCHER, 1992).
  - Lors des crues les seuils facilitent généralement les débordements dans le lit majeur à leur amont.
  - Lors de l'étiage évaporation dans le plan d'eau amont.
  - Les seuils bloquent la plus grande partie de la charge alluviale grossière de fond ce qui entraîne à l'aval une érosion progressive (se propageant depuis le seuil vers l'aval) conduisant à l'incision du lit mineur.
  - Les seuils bloquent la plus grande partie de la charge alluviale fine de fond ce qui entraîne un colmatage du substrat jusqu'à devenir vaseux.
  - Réduction du linéaire de faciès lotique au profit de faciès lentique diminue la diversité des habitats, donc la diversité biologique au détriment des salmonidés (zones de fraie et de développement des jeunes).
  - Rupture de l'équilibre débit liquide/débit solide qui est un élément essentiel de la dynamique fluviale.
  - L'augmentation du niveau de l'eau en amont des seuils entraîne un accroissement de l'énergie de la rivière en aval. Cette énergie ne pouvant pas être utilisée par la rivière pour transporter des sédiments (ceux-ci ayant été piégés en amont du seuil), elle est dissipée en érodant le lit et les berges du cours d'eau.

- Dans la partie court-circuitée de la rivière, une eutrophisation du milieu aquatique ainsi qu'une modification et une perturbation de la faune peuvent être observées.
  - Développement des Cyanobactéries et la formation de fleurs d'eau (Agences de l'eau Loire Bretagne, 1997).
  - Accroît « l'habitabilité » des plans d'eau de seuils pour certaines espèces et diminue « l'habitabilité » pour d'autres espèces dû l'augmentation des profondeurs d'eau et de la température ainsi que la diminution des vitesses.
  - Changement des réseaux trophiques (appelé dérive typologique) caractérisé par l'augmentation de la production phytoplanctonique et par le développement du zooplancton et d'une faune benthique limnophile dominée par les Mollusques, les Oligochètes et les Chironomidés (MALAVOI, 2003) Colmaté par des fines le substrat s'uniformise, n'offrant plus qu'une faible variété de milieu pour la faune aquatique.
  - Déstructuration des caractéristiques de l'habitat aquatique : qui sert de support pour toutes les fonctions biologiques (reproduction, nutrition...).
- L'installation peut constituer un obstacle aux migrations des poissons comme les saumons atlantiques, l'anguille, et la truite. Cependant la notion d'obstacle (hauteur de chute, fosse d'appel) à la migration doit être envisagée pour une espèce donnée car tous les poissons n'ont pas les mêmes capacités de nage et de saut.

### **Solutions d'accompagnement :**

Cependant, si la microcentrale est bien conçue, la plupart des atteintes à l'environnement peuvent être minimisées mais pas totalement contrôlé.

- En assurant le respect du débit réservé.
- Par la mise en place de passes à poissons adéquats.
- En veillant à l'intégration de la microcentrale dans le paysage.
- En outre, au niveau de l'entretien des cours d'eau, le dégrilleur peut jouer un rôle non négligeable en éliminant les éléments flottants.

Cependant lorsque l'on tient compte du nombre important d'atteintes à l'environnement liées aux microcentrales il est nécessaire de réfléchir à un moyen de production d'énergie hydraulique moins contraignant pour l'écosystème aquatique.

C'est pour cela que nous allons voir dans une seconde partie quel pourrait être la capacité et les avantages d'une production d'énergie à l'aide des moulins bateaux ou moulins flottants.

## **2. DU MOULIN-BATEAU A LA PRODUCTION D'ENERGIE**

### **2.1. Historique** (Claude Rivals, 2000)

Nul en France ne se souvient des moulins flottants de nos rivières. La plupart ont disparu vers le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, très rares sont ce qui tournaient encore au XX<sup>e</sup> siècle.

Rares sont les personnes qui savent que quatre moulins bateaux travaillaient encore quelque part en Europe centrale en 1988.

#### **A) La naissance des moulins bateaux**

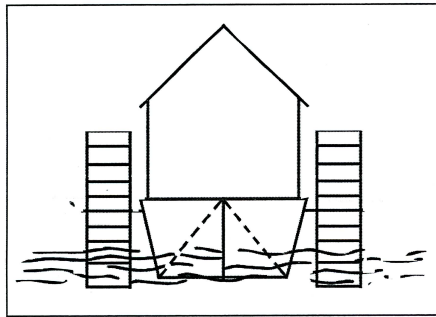
Il était une fois en 537.

Il est extrêmement rare que la naissance d'une technique soit aussi précisément localisée et datée, ainsi on peut douter de l'exactitude de ce récit écrit à la gloire d'un général. Aucune critique sérieuse n'a permis de discréditer ce repère historique il faut donc l'accepter tel qui nous est donné.

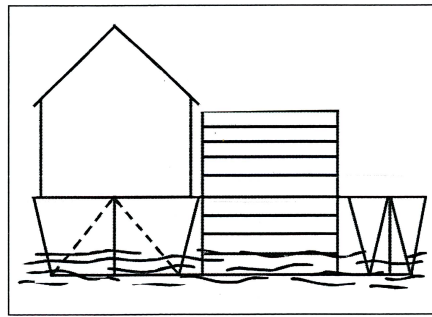
Cela c'est passé sous Justinien en 537 dans Rome assiégée par Vitigès, roi des goths, qui est parvenu à faire couper les quatre aqueducs qui apportaient quotidiennement l'eau nécessaire à la ville pour son alimentation en eau potable et pour le fonctionnement de ses moulins à eau. L'historien byzantin Procope a raconté en 555 dans son Livre des Guerres comment les moulins furent adaptés aux bateaux ; comment le défenseur de la ville, le général byzantin Bélisaire trouva cette solution :

« Tout de suite après le pont correspondant au mur de circonvallation, en aval, il fit attacher des cordes bien tendues, d'une rive à l'autre et y fixa des barques accolées, distantes entre elles de la largeur de la roue, à l'endroit où l'eau franchit les arches du pont avec la plus grande rapidité. Sur chaque barque il installa un moulin et les deux furent actionnés par la même roue. »

Ainsi le moulin flottant est né des nécessités de guerre et du mariage du moulin et du bateau. L'idée est ingénieuse, les bateaux se trouvent immobilisés en plein courant, entre eux, tournent les roues qui transmettent leur mouvement aux meules qu'ils abritent. Il existe deux sortes de moulins-bateaux les moulins à simple ou à double harnois (Cf. figure 4p26)



Moulin à double harnois : Le moulin-bateau entre deux roues latérales symétriques



Moulin à simple harnois : une roue unique entre le moulin-bateau et le bateau flotteur

**Figure 4** : Typologie sommaire  
(Claude Rivals, 2000)

## **B) Devenir des moulins flottants au cours des siècles en France et en Europe.**

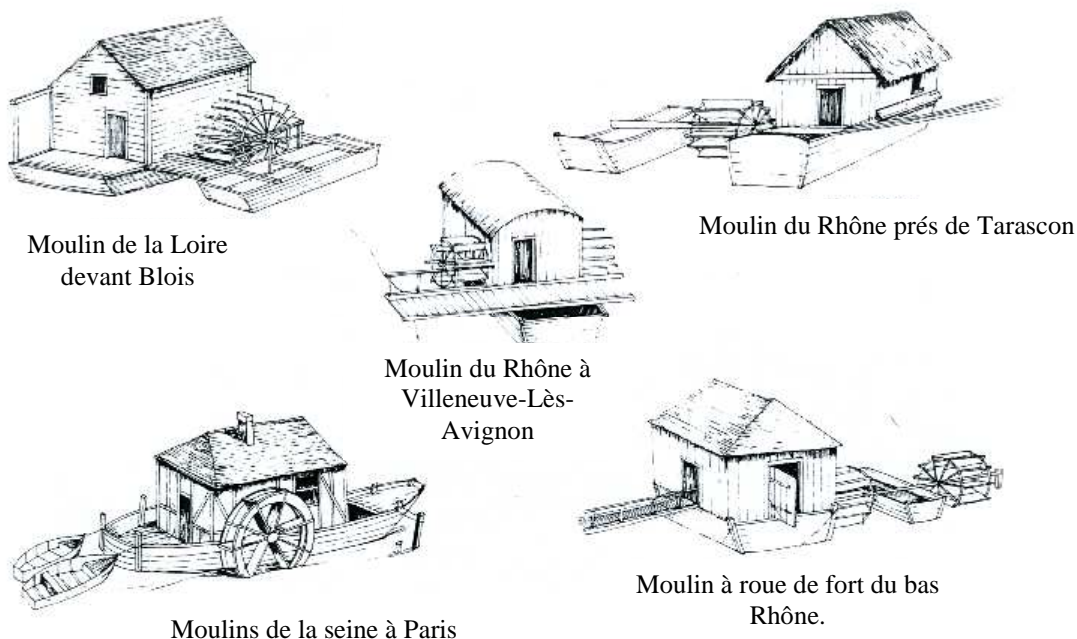
### *1) En France*

Au Xe siècle, des moulins bateaux serviront à moudre la farine dans presque toutes les grandes villes.

A Angers, vers 1028, Foulque Nerra, comte d'Anjou, autorise le monastère de Ronceray à établir moulins et pêcheries sous toutes les arches du pont de pierre qu'il vient de construire sur la Maine, sauf toutefois l'arche dont il a disposé en faveur des chanoines de Saint-Martin.

Sur la seine, à Paris, des moulins bateaux sont accrochés aux ponts en 1033. Au 13 siècle, près du pont au change, un pont de bois nommé pont aux colombes puis par la suite pont au Meunier servait de communication à des moulins flottants et desservaient treize moulins placés sous ses arches dont une seule était réservée à la navigation. A la fin du Moyen Age, la Seine était couverte de moulins : on pouvait en compter une cinquantaine entre l'île Notre-Dame et le pont aux Meuniers. Au XVIe siècle, ce sont 55 moulins bateaux qui alimentent Paris en farine.

A Toulouse, à la fin du XIIe siècle il est question de moulins bateaux sur la Garonne ; depuis des décennies une importante flottille d'une soixantaines de ces usines se répartissant près de la rive droite du Château Narbonnais à la Daurade et au Bazacle.



**Figure 5 : Quelques moulins-bateaux français**  
(Le Chasse marée n°11 1984)

## 2) En Europe

Des milliers de moulins bateaux travaillent sur les rivières et les fleuves européens, on se contentera de quelques indications.

En Allemagne, il y en eut sur le Donau, le Rhin, la Weser, la Leine, l'Elbe, la Mulde, l'Older, la Saale. Sur le Rhin, la première mention remonte à 840, d'autres à 983, 1002, 1112.

A l'époque de Luther (1483-1546) cinq cent trente quatre moulins flottants travaillent sur l'Elbe. Au dix-huitième, on pouvait encore voir à Köln, plusieurs exemplaires de ceux qui avaient été installés au quinzième siècle sur le Rhein.



En Italie, l'Adige en comptait quatre cent au XIXe siècle ; en Autriche en 1821, il y avait cinquante deux moulins bateaux à Vienne ; et en 1833 sur une portion de quatre vingt kilomètres, aux abords de Budapest et dans la même ville, le Danube comptait quatre cents. Des moulins flottants ont existé au moins dans cinq villes des Pays-Bas le long des rivières Maas, Waal et Ljssel.

### *3) Une disparition annoncée*

Face aux pressions exercées par les différents gouvernements afin d'encourager le commerce fluvial les moulins bateaux disparaissent peu à peu. Considéré comme obstacle à la navigation, quelques uns subsistaient mais on était loin de la grande époque des moulins flottants.

De plus leurs propriétaires les remplacent par de puissants moulins terriers à l'image des célèbres moulins de Bazacle, connus dans toute l'Europe.

On en trouvera cependant encore sur la Loire et le Doubs jusqu'au début du XXe siècle.

Le dernier moulin bateau du département de la seine disparu au court du XIXe siècle en effet en 1836, les ponts et chaussées retirèrent à son propriétaire M. Adancourt sa permission car il gênait la navigation mais celui-ci réclama auprès du Roi Louis-Philippe, qui intervint en sa faveur. Cependant après la mort de son propriétaire, sa femme sollicitée par sa clientèle reprit son activité mais soumis à un hiver rude, la seine gela et la débâcle brisa le vieux moulin qui coula. Le service de la navigation lui retira la permission d'installer un nouveau bateau moulin.

Monocoques, comme à Toulouse, ou double-coques, leur coexistence sera toujours difficile avec les navires servant au transport des marchandises, et ils disparaîtront progressivement.

### *4) Aujourd'hui*

Actuellement tombés dans l'oubli, les moulins bateaux n'ont pas totalement disparu, et c'est à certains pays d'Europe Centrale que nous devons pouvoir encore en observer quelques exemplaires conservés « en liberté » ou dans le cadre de divers musées de plein air.

Le dernier des moulins flottants sur l'Adige ayant disparu des rives de Badia Poleisne en 1977.

Au début des années 1980 seuls les bassins de L'Elbe et du Danube conservaient encore des moulins bateaux (une douzaine) dont quelques un étaient en activité sur certains affluents du bas et moyen Danube.

Sans ces lointains survivants et quelques rares maquettes, on doit se contenter de gravures anciennes, lithographies ou tableaux souvent imprécis ou de documents d'archives pour pouvoir se figurer ces moulins flottants.

Heureusement quelques musées en ont conservés :

- Le Muzeul Bruckenthal, musée de la technique populaire, près du bourg de Sibiu, en Roumanie
- Le Musée Régional de Düben, en Allemagne
- Le Musée du moulin à Orfű et le Musée Skansen de l'île de Szentendre, en Hongrie.

Un projet de construction de moulin bateau en Anjou piloté par l'association des amis du moulin de Sarré a été envisagé en 1995, mais il n'a pas eut de suite.

Cependant face à une volonté mondiale pour une production d'énergie renouvelable propre, on assiste à une multiplication des projets de production d'énergie s'inspirant des techniques anciennes des moulins bateaux, les hydroliennes en mer.

Ces projets n'étant qu'en phase d'élaboration il est difficile d'obtenir des données sur le procédé de conversion des moulins bateaux en micro centrales hydroélectriques.

## 2.2. Principe de fonctionnement d'un moulin flottant

Le moulin bateau fonctionne selon le même principe qu'un moulin, il converti l'énergie cinétique du fluide en énergie mécanique.

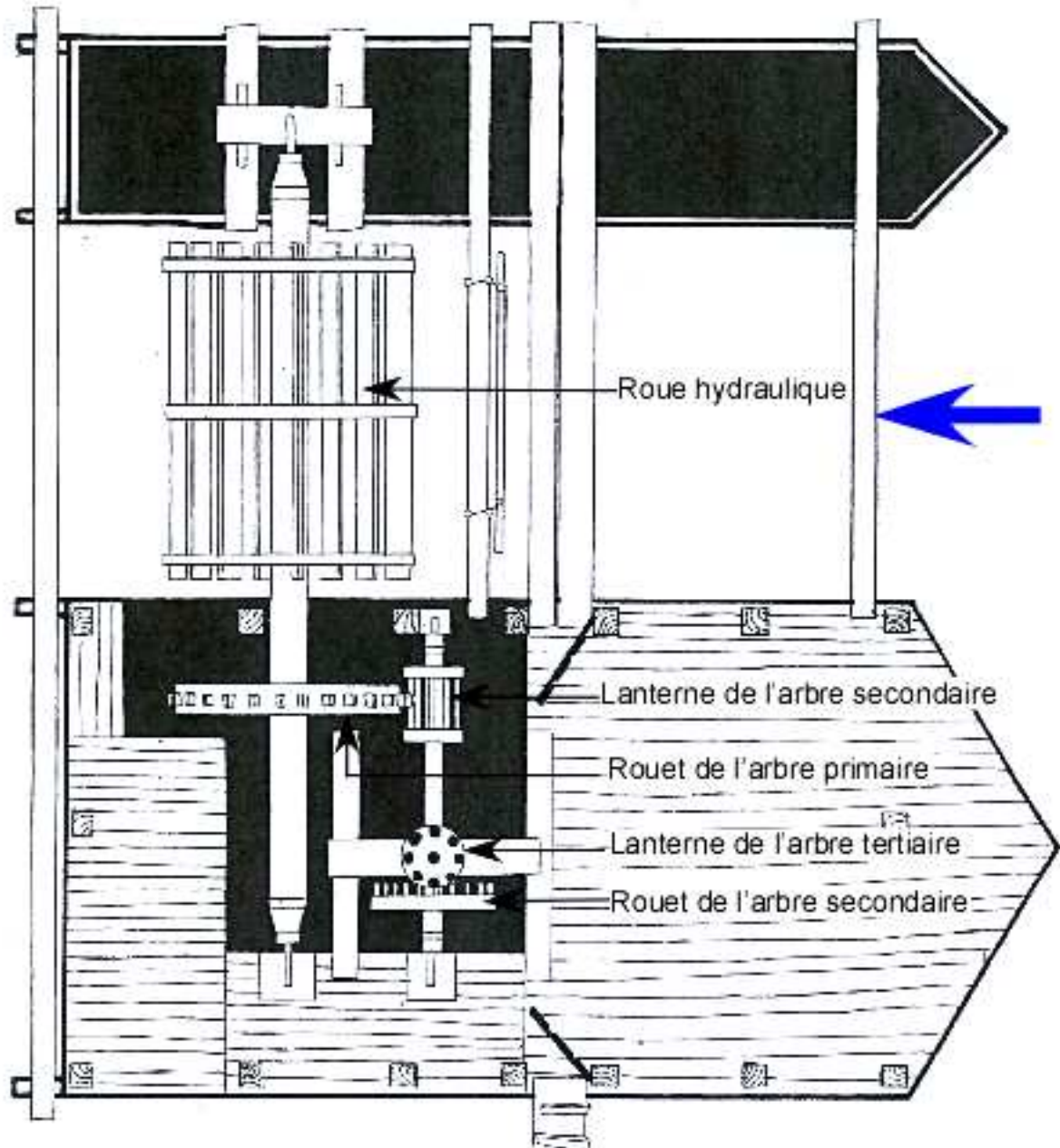


Figure 6 : Vue du dessus du mécanisme d'un moulin bateau  
(L Muzeul tehnicii populare, Sibiu, 1981)

La roue hydraulique mise en mouvement par l'énergie du courant entraîne le rouet de l'arbre primaire qui met en action le rouet de l'arbre secondaire par le biais de la lanterne de l'arbre secondaire puis la lanterne de l'arbre tertiaire entraîne la meule située au dessus de celui-ci.

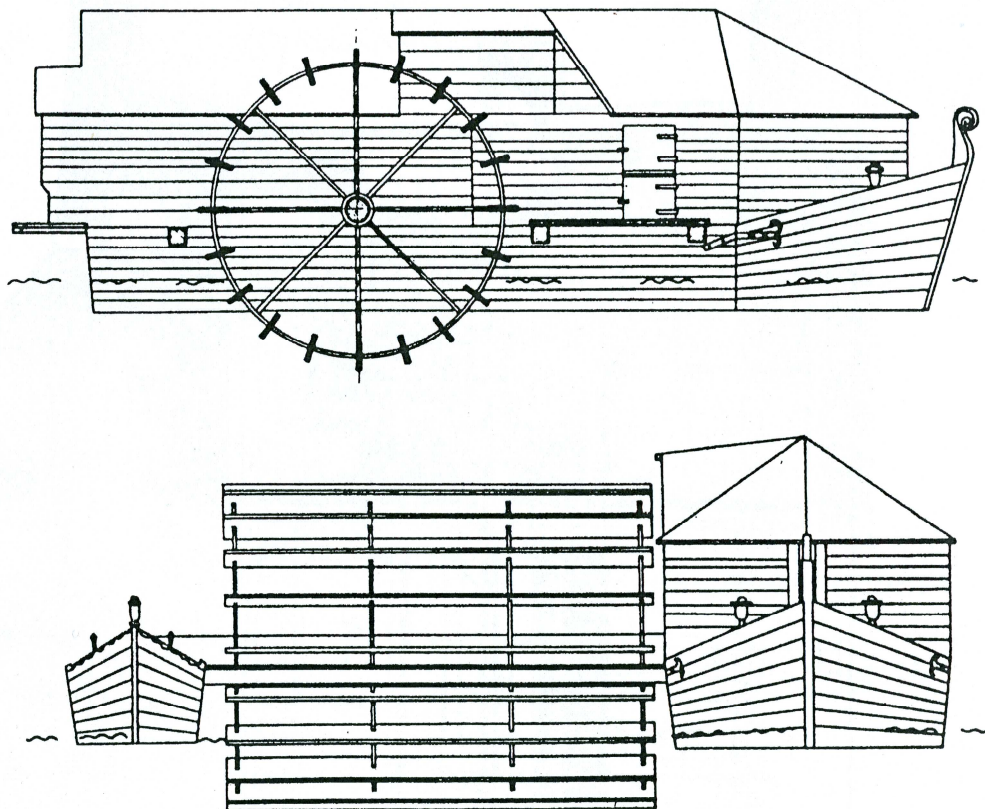


Figure 7 : Vue de devant et de côté d'un moulin bateau de Reckève Hongrie  
(Le Chasse marée n°11 1984)

À l'inverse d'une microcentrale le bateau moulin est mobile :

- On peut le déplacer dans des secteurs où les veines de courant sont plus importantes afin d'optimiser la production d'énergie.
- Il tire son énergie du courant et non de la chute, il ne nécessite pas la construction d'un barrage ou d'une amenée d'eau ou d'autre infrastructure de génie civile associée au microcentrale et donc il est moins perturbateur pour les écosystèmes.
- Il peut fonctionner sans intermittence (sauf en cas d'étiage trop sévère), en effet étant flottant il s'adapte à la hauteur de la lame d'eau disponible.
- Cependant il nécessite une protection de type grillagé en amont et en aval du système afin de protéger les espèces migratrices et la faune aquatique.
- De plus le moulin bateau nécessite des fleuves d'une certaine importance laissant aux microcentrales les cours d'eau plus modestes. Il peut être installé là où on ne pourrait pas mettre en place une microcentrale.

## 2.3. Calcul de la capacité énergétique d'un moulin flottant

### A) Méthodologie

Afin de déterminer la capacité de production d'énergie par un moulin bateau il faut procéder par étapes :

Dans un premier temps il est nécessaire de faire le choix des vitesses des courants. Afin de quantifier le plus justement possible les capacités de production électrique et de ne pas favoriser un court plus qu'un autre ; j'ai fait le choix d'échelonner les vitesses d'écoulements de 0,1m/s ce qui correspondrait à un débit d'étiage extrême à 4m/s ce qui correspond à une vitesse de crue extrême.

Puis il faut calculer la force de l'eau en Newton engendrée par ces vitesses avec :

$$F_{\text{eau}} = S * V^2 * \gamma$$

Avec

**S** : surface de la pale en m<sup>2</sup>

**V** : vitesse de l'eau en m/s

**γ** : masse volumique de l'eau en kg/m<sup>3</sup>

Puis on calcule le couple de force en Newton/m qui est le produit de la force de l'eau et de la hauteur de pale immergé

$$C = F_{\text{eau}} * H$$

Avec

**F<sub>eau</sub>** en Newton

**H** en m

Ensuite on calcule la puissance mécanique en Watt engendré, ce qui résulte du produit du couple (**C**) et de la vitesse angulaire en tours/minute

$$P_{\text{méca}} = \Omega * C$$

$$P_{\text{méca}} = \Omega * C$$

Avec

$\Omega$  en Tours/minute

C en N/m

Pour obtenir la vitesse angulaire

$$\Omega = (V/\text{Rayon}) * 60$$

Avec

$\Omega$  en Tours/minute

V : vitesse de l'eau en m/s

Rayon : en m

La puissance électrique est obtenu en multipliant la puissance mécanique par 80% ce qui correspond au rendement d'un alternateur classique.

La production électrique dépend principalement de deux facteurs

- Surface et forme des pales qui peuvent être modulées.
- Vitesse d'écoulement que l'on ne peut pas contrôler.

Dans le cas présent afin de simplifier les calculs, les pales sont de formes rectangulaires avec 5 choix de surfaces de pales :

- 7,5m<sup>2</sup> (L 1,5m \* l 5m).
- 15m<sup>2</sup> (L 1,5m \* l 10m) ou 2 systèmes de pales de 7,5m<sup>2</sup> (L 1,5m \* l 5m) moulin bateau types doubles Harnois (Cf. figure 4p26).
- 20m<sup>2</sup> (L 2m \* l 10m).
- 30m<sup>2</sup> (L 1,5m \* l 20m) ou 2 pales de 15m<sup>2</sup> (L 1,5m \* l 10m) moulin bateau types doubles Harnois (Cf. figure 4p26).
- 50m<sup>2</sup> (L 2m \* l 25m).

## **B) Résultats (Cf. Figure 8p35)**

Afin de rester le plus près possible de la réalité j'ai choisi d'interpréter les résultats pour des vitesses de courants de 0,5 ; 1 ; 2 et 3m/s. Cependant vous pouvez trouver le détail des résultats en annexe avec des vitesses allant jusqu'à 4m/s. De plus ces résultats sont à prendre avec précaution étant donné que les facteurs comme les frottements et bien d'autres n'ont pas été pris en compte.

Pour une vitesse de 0,5m/s on obtient un rendement électrique de:

- 7 KW (Kilos Watts) pour une surface de pale égale à 7,5 m<sup>2</sup> .
- 14 KW pour une surface de pale égale à 15 m<sup>2</sup>.
- 19 KW pour une surface de pale égale à 20 m<sup>2</sup>.
- 28 KW pour une surface de pale égale à 30 m<sup>2</sup>.
- 47 KW pour une surface de pale égale à 50 m<sup>2</sup>.

Pour une vitesse de 1m/s on obtient un rendement électrique de:

- 57 KW (Kilos Watts) pour une surface de pale égale à 7,5 m<sup>2</sup>.
- 115 KW pour une surface de pale égale à 15 m<sup>2</sup>.
- 150 KW pour une surface de pale égale à 20 m<sup>2</sup>.
- 230 KW pour une surface de pale égale à 30 m<sup>2</sup>.
- 380 KW pour une surface de pale égale à 50 m<sup>2</sup>.

Pour une vitesse de 2 m/s on obtient un rendement électrique de:

- 460 KW pour une surface de pale égale à 7,5 m<sup>2</sup>.
- 917 KW pour une surface de pale égale à 15 m<sup>2</sup>.
- 1220 KW pour une surface de pale égale à 20 m<sup>2</sup>.
- 1830 KW soit quasiment 2 MW pour une surface de pale égale à 30 m<sup>2</sup>.
- 3057 KW soit 3 MW pour une surface de pale égale à 50 m<sup>2</sup>.

Pour une vitesse de 3 m/s (maximum en débit de crue sur la Loire) on obtient un rendement électrique de:

- 1547 KW soit 1,5 MW pour une surface de pale égale à 7,5 m<sup>2</sup>.
- 3095 KW soit 3MW pour une surface de pale égale à 15 m<sup>2</sup>.
- 4127 KW soit 4MW pour une surface de pale égale à 20 m<sup>2</sup>.
- 6191 KW soit 6 MW pour une surface de pale égale à 30 m<sup>2</sup>.
- 10318 KW soit 10 MW pour une surface de pale égale à 50 m<sup>2</sup>.

La capacité de production d'électricité d'un moulin bateau n'a rien à envier à une microcentrale classique même pour des vitesses de courant faible.

Mais la fluctuation des vitesses peut être importante entre les débits de crue et les débits d'étiage cependant il en est de même pour une microcentrale.

Si une initiative de construction d'une « microcentrale hydroélectrique flottante » est prise un jour, il faudra bien étudier les vitesses du courant du lieu visé par son implantation, afin de prévoir le dimensionnement le plus juste de l'installation.

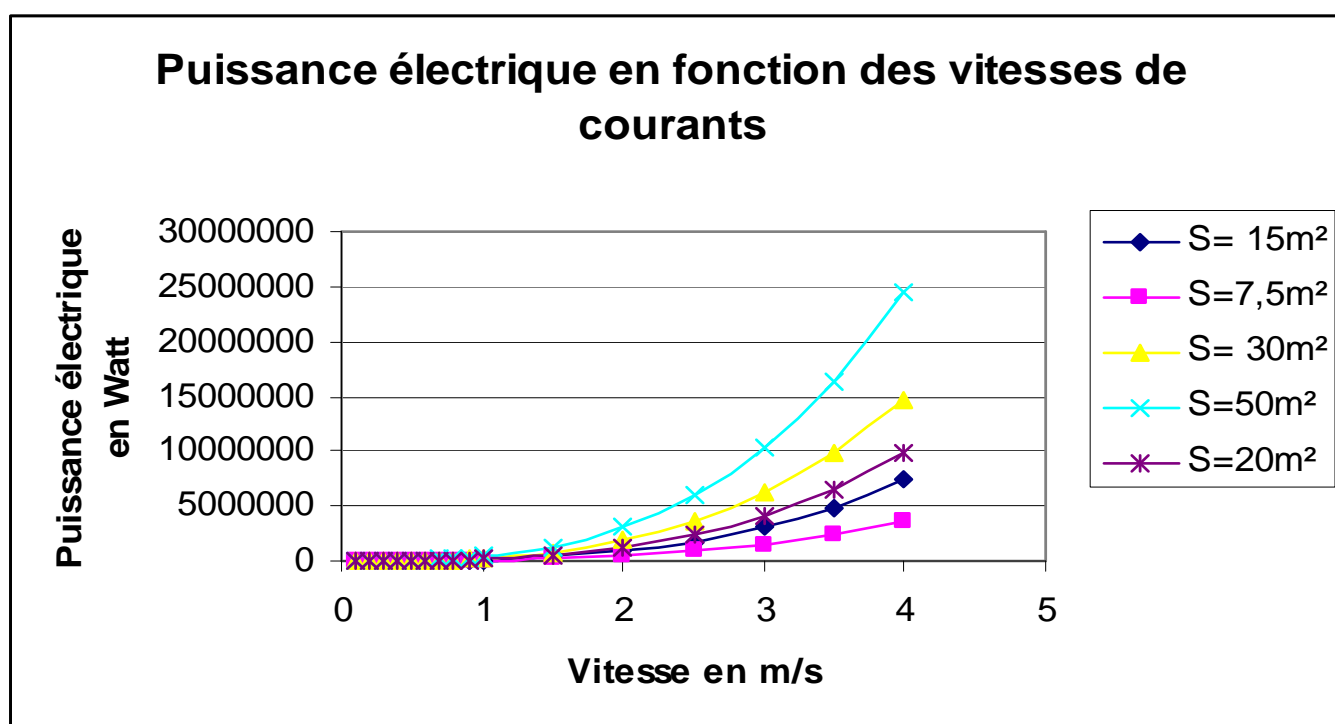


Figure 8 : Graphique comparant la production d'énergie électrique d'un moulin Bateau en fonction de la vitesse du courant et des différentes surfaces de pales.

Cependant ce procédé de production d'énergie a de vraie capacité et mérite d'être étudié de façon plus approfondie. Ces l'installations peuvent être imposantes et poser des problèmes de conflits d'usages en particulier sur les grands fleuves navigables.



Il faut garder à l'esprit que dans mes exemples je joue avec plusieurs surfaces de pales, la plus longue est de 25m pour une surface de 50m<sup>2</sup>, mais c'est la surface qui compte est non la longueur on peut donc attribuer à une pale une largeur plus importante pour des fleuves profonds afin de ne pas prendre trop d'emprise sur la largeur du fleuve.

## **2.4. Comparaison énergétique avec l'éolien**

Dans des conditions optimum de vitesse des vents la production électrique d'une éolienne (Cf. figure 9p36) est de 300KW pour une petite éolienne de 30 m de diamètre et une taille de 50m ce qui est tout à fait comparable à ce que peut produire une microcentrale ; à 5MW pour une grande éolienne de 125m de diamètre et une taille de 200m. (cf. figure 9p35)

Cependant en général, la vitesse des vents est supérieure à celle des courants, mais comme la densité de l'eau est bien plus importante que celle de l'air (le rapport est d'environ 800), un moulin bateau peut produire plus d'énergie qu'une éolienne à « dimensions égales ».



**Figure 9** : Les différentes tailles d'éoliennes et leurs capacités énergétiques associées

Cependant les éoliennes ne fonctionnent pas de façon continue, ils subissent des fluctuations de la vitesse des vents au même titre que les centrales hydroélectriques subissent les fluctuations de vitesses des courants.

Comme on l'a vu précédemment dans des conditions optimum de vitesse (2m/s) de courant la plus petite installation de moulin bateau peut fournir une puissance de 460 KW avec un pic à 1,5 MW lors des événements de crue, ce qui est supérieur à la production de la plus petite éolienne qui de 300 KW pour des conditions optimum.

Un moulin bateau est donc tout à fait compétitif, et pourrait se relever plus efficace q'une éolienne à dimension égale.

# CONCLUSION

Il est difficile d'évaluer de façon précise la proportion de la production d'énergie en de la micro hydraulique (<500KW) en France et en Europe. En effet dans la grande majorité des cas la production d'électricité via les microcentrales est faite par des producteurs indépendants publics ou privés (particuliers ou collectivités locales) qui produisent l'énergie pour leur propre consommation.

Cependant le territoire français est équipé à plus de 90 % de son potentiel par des grosses installations hydroélectriques c'est pourquoi les microcentrales recèlent encore un fort potentiel en France et en Europe.

Mais les microcentrales hydroélectriques ont une forte incidence sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Elles entraînent une homogénéisation des hydrosystèmes ce qui a pour conséquences de réduire la biodiversité des écoulements et donc des espèces faunistiques et floristiques associés.

Dans ce contexte l'alternative des moulins bateaux est intéressante car ils engendrent moins de perturbation sur les hydrosystèmes dû à l'absence d'infrastructures de génie civile qui pose problème dans le cas des microcentrales. De plus leur mobilité ainsi que leur capacité à s'adapter à la hauteur de la lame est un avantage certain en terme de production d'énergie et leur capacité de production d'énergie est tout à fait compétitive par rapport à l'éolien et au microcentrale classique.

Cependant il est nécessaire de prendre des protections de type grillagé ou autre à l'égard de la faune et de la flore aquatique afin qu'il ne soit pas happé par les pales du système.

Les moulins bateaux nécessite des fleuves d'une certaine importance laissant aux microcentrales les cours d'eau plus modestes. Ils peuvent être installé là où on ne pourrait pas mettre en place une microcentrale et donc participe à l'augmentation de la capacité d'exploitation de l'énergie hydraulique sur le territoire Français ce qui est en accord avec l'objectif de la France et de l'Europe, soit 21% de la consommation française et 22% de la consommation européenne produite par les énergies renouvelables et ceci dans une optique de développement durable afin de lutter contre le réchauffement climatique.

# BIBLIOGRAPHIE

## Sites Internet :

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

[www.edf.fr](http://www.edf.fr)

[www.ecologie.gouv.fr](http://www.ecologie.gouv.fr)

<http://www.a3i.fr/index.htm>

<http://perso.wanadoo.fr/biefs.dupilat/energiren.htm/>

[http://www.canren.gc.ca/tech\\_appl/index\\_f.asp?CaID=4&PgID=317](http://www.canren.gc.ca/tech_appl/index_f.asp?CaID=4&PgID=317)

<http://www.eauxvives.org/environnement/cochet.htm>

<http://www.inti.be/ecotopie/hydro.html#crit>

<http://perso.wanadoo.fr/energies-nouvelles-entreprises/chp15-3.htm>

[http://www.ciele.org/visite/visite\\_hydraulique.htm](http://www.ciele.org/visite/visite_hydraulique.htm)

## Ouvrages :

Yves Cochet, 2000 Rapport au Premier ministre : Stratégie et moyens de développement de l'efficacité énergétique et des sources d'énergie renouvelables en France.

Claude Rivals, 2000 Le Moulin à nef.

Archives du départementales du Maine et Loire pour les documents anciens.

Christian Cussonneau, 1996 Farine de Loire, Meunier du port, Moulins-Bateaux en Anjou.

Moulin de France Revue de la Fédération des Amis des moulins juillet 2002.

Le Chasse-marée n°11, 1984.

# TABLES DES MATIERES

RESUME.....	p.2
SUMMARY.....	p.3
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	p.4
INTRODUCTION.....	p.5

## **1. L'ENERGIE MICROHYDRAULIQUE**.....p.6

<b><u>1.1. Qu'est-ce que l'énergie hydraulique ?</u></b> .....	p.6
A) Définition.....	p.6
B) Historique.....	p.6
<b><u>1.2. L'énergie hydraulique des microcentrales dans quel but ?</u></b> .....	p.9
<b><u>1.3. Le fonctionnement et les caractéristiques d'une microcentrale</u></b> .....	p.10
A) Définition.....	p.10
B) Fonctionnement.....	p.11
<b><u>1.4. Procédure d'implantation d'une microcentrale</u></b> .....	p.13
<b><u>1.5. Coût d'installation d'une microcentrale</u></b> .....	p.16
<b><u>1.6. Inventaire des équipements hydroélectriques sur le bassin de la Loire</u></b> .....	p.17
<b><u>1.7. Bilan en Europe de la petite hydroélectricité</u></b> .....	p.19
<b><u>1.8. Objectifs en Europe</u></b> .....	p.21
<b><u>1.9. Avantages, limites et inconvénients</u></b> .....	p.21

## **2. DU MOULIN-BATEAU A LA PRODUCTION D'ENERGIE**

<b><u>2.1. Historique</u></b> .....	p.25
A) Naissance des Moulins bateaux.....	p.25
B) Devenir des moulins flottants au cours des siècles en France et en Europe.....	p.26
1) En France.....	p.26
2) En Europe.....	p.27
3) Une Disparition annoncée.....	p.28
4) Aujourd'hui.....	p.28
<b><u>2.2. Principe de fonctionnement d'un moulin bateau</u></b> .....	p.30
<b><u>2.3. Calcul de la capacité énergétique d'un moulin bateau</u></b> .....	p.32
A) Méthodologie.....	p.32
B) Résultats.....	p.34
<b><u>2.4. Comparaison énergétique avec l'éolien</u></b> .....	p.34

CONCLUSION.....	p.38
BIBLIOGRAPHIE.....	p.39
TABLE DES MATIERES.....	p.40
ANNEXES.....	p.41

# ANNEXES

Annexe 1 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de 7,5m<sup>2</sup>

Annexe 2 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de 15m<sup>2</sup>

Annexe 3 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de 20m<sup>2</sup>

Annexe 4 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de 30m<sup>2</sup>

Annexe 5 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de 50m<sup>2</sup>

Annexe 1 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de  
7,5m<sup>2</sup>

vitesse m/s	force de l'eau N/m	Couple N/m <sup>2</sup>	Vitesse angulaire rad/s	Vitesse angulaire Tour/min	Puissance mécanique Watt	Puissance électrique Watt
0,1	75	112,5	0,066666667	0,636942675	71,65605096	57,32484076
0,2	300	450	0,133333333	1,27388535	573,2484076	458,5987261
0,3	675	1012,5	0,2	1,910828025	1934,713376	1547,770701
0,4	1200	1800	0,266666667	2,547770701	4585,987261	3668,789809
0,5	1875	2812,5	0,333333333	3,184713376	8957,006369	7165,605096
0,6	2700	4050	0,4	3,821656051	15477,70701	12382,16561
0,7	3675	5512,5	0,466666667	4,458598726	24578,02548	19662,42038
0,8	4800	7200	0,533333333	5,095541401	36687,89809	29350,31847
0,9	6075	9112,5	0,6	5,732484076	52237,26115	41789,80892
1	7500	11250	0,666666667	6,369426752	71656,05096	57324,84076
1,5	16875	25312,5	1	9,554140127	241839,172	193471,3376
2	30000	45000	1,333333333	12,7388535	573248,4076	458598,7261
2,5	46875	70312,5	1,666666667	15,92356688	1119625,796	895700,6369
3	67500	101250	2	19,10828025	1934713,376	1547770,701
3,5	91875	137812,5	2,333333333	22,29299363	3072253,185	2457802,548
4	120000	180000	2,666666667	25,47770701	4585987,261	3668789,809

Annexe 2 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de  
15m<sup>2</sup>

vitesse m/s	force de l'eau N/m	Couple N/m <sup>2</sup>	Vitesse angulaire rad/s	Vitesse angulaire Tour/min	Puissance mécanique Watt	Puissance électrique Watt
0,1	150	225	0,066666667	0,636942675	143,3121019	114,6496815
0,2	600	900	0,133333333	1,27388535	1146,496815	917,1974522
0,3	1350	2025	0,2	1,910828025	3869,426752	3095,541401
0,4	2400	3600	0,266666667	2,547770701	9171,974522	7337,579618
0,5	3750	5625	0,333333333	3,184713376	17914,01274	14331,21019
0,6	5400	8100	0,4	3,821656051	30955,41401	24764,33121
0,7	7350	11025	0,466666667	4,458598726	49156,05096	39324,84076
0,8	9600	14400	0,533333333	5,095541401	73375,79618	58700,63694
0,9	12150	18225	0,6	5,732484076	104474,5223	83579,61783
1	15000	22500	0,666666667	6,369426752	143312,1019	114649,6815
1,5	33750	50625	1	9,554140127	483678,3439	386942,6752
2	60000	90000	1,333333333	12,7388535	1146496,815	917197,4522
2,5	93750	140625	1,666666667	15,92356688	2239251,592	1791401,274
3	135000	202500	2	19,10828025	3869426,752	3095541,401
3,5	183750	275625	2,333333333	22,29299363	6144506,369	4915605,096
4	240000	360000	2,666666667	25,47770701	9171974,522	7337579,618



Annexe 3 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de  
20m<sup>2</sup>

vitesse m/s	force de l'eau N/m	Couple N/m <sup>2</sup>	Vitesse angulaire rad/s	Vitesse angulaire Tour/min	Puissance mécanique Watt	Puissance électrique Watt
0,1	200	400	0,05	0,477707006	191,0828025	152,866242
0,2	800	1600	0,1	0,955414013	1528,66242	1222,929936
0,3	1800	3600	0,15	1,433121019	5159,235669	4127,388535
0,4	3200	6400	0,2	1,910828025	12229,29936	9783,43949
0,5	5000	10000	0,25	2,388535032	23885,35032	19108,28025
0,6	7200	14400	0,3	2,866242038	41273,88535	33019,10828
0,7	9800	19600	0,35	3,343949045	65541,40127	52433,12102
0,8	12800	25600	0,4	3,821656051	97834,3949	78267,51592
0,9	16200	32400	0,45	4,299363057	139299,3631	111439,4904
1	20000	40000	0,5	4,777070064	191082,8025	152866,242
1,5	45000	90000	0,75	7,165605096	644904,4586	515923,5669
2	80000	160000	1	9,554140127	1528662,42	1222929,936
2,5	125000	250000	1,25	11,94267516	2985668,79	2388535,032
3	180000	360000	1,5	14,33121019	5159235,669	4127388,535
3,5	245000	490000	1,75	16,71974522	8192675,159	6554140,127
4	320000	640000	2	19,10828025	12229299,36	9783439,49

Annexe 4 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de  
30m<sup>2</sup>

vitesse m/s	force de l'eau N/m	Couple N/m <sup>2</sup>	Vitesse angulaire rad/s	Vitesse angulaire Tour/min	Puissance mécanique Watt	Puissance électrique Watt
0,1	300	450	0,066666667	0,636942675	286,6242038	229,2993631
0,2	1200	1800	0,133333333	1,27388535	2292,993631	1834,394904
0,3	2700	4050	0,2	1,910828025	7738,853503	6191,082803
0,4	4800	7200	0,266666667	2,547770701	18343,94904	14675,15924
0,5	7500	11250	0,333333333	3,184713376	35828,02548	28662,42038
0,6	10800	16200	0,4	3,821656051	61910,82803	49528,66242
0,7	14700	22050	0,466666667	4,458598726	98312,10191	78649,68153
0,8	19200	28800	0,533333333	5,095541401	146751,5924	117401,2739
0,9	24300	36450	0,6	5,732484076	208949,0446	167159,2357
1	30000	45000	0,666666667	6,369426752	286624,2038	229299,3631
1,5	67500	101250	1	9,554140127	967356,6879	773885,3503
2	120000	180000	1,333333333	12,7388535	2292993,631	1834394,904
2,5	187500	281250	1,666666667	15,92356688	4478503,185	3582802,548
3	270000	405000	2	19,10828025	7738853,503	6191082,803
3,5	367500	551250	2,333333333	22,29299363	12289012,74	9831210,191
4	480000	720000	2,666666667	25,47770701	18343949,04	14675159,24

Annexe 5 : Résultats détaillés du calcul de la puissance électrique en fonction de la vitesse du courant pour une surface de  
50m<sup>2</sup>

vitesse m/s	force de l'eau N/m	Couple N/m <sup>2</sup>	Vitesse angulaire rad/s	Vitesse angulaire Tour/min	Puissance mécanique Watt	Puissance électrique Watt
0,1	500	1000	0,05	0,477707006	477,7070064	382,1656051
0,2	2000	4000	0,1	0,955414013	3821,656051	3057,324841
0,3	4500	9000	0,15	1,433121019	12898,08917	10318,47134
0,4	8000	16000	0,2	1,910828025	30573,24841	24458,59873
0,5	12500	25000	0,25	2,388535032	59713,3758	47770,70064
0,6	18000	36000	0,3	2,866242038	103184,7134	82547,7707
0,7	24500	49000	0,35	3,343949045	163853,5032	131082,8025
0,8	32000	64000	0,4	3,821656051	244585,9873	195668,7898
0,9	40500	81000	0,45	4,299363057	348248,4076	278598,7261
1	50000	100000	0,5	4,777070064	477707,0064	382165,6051
1,5	112500	225000	0,75	7,165605096	1612261,146	1289808,917
2	200000	400000	1	9,554140127	3821656,051	3057324,841
2,5	312500	625000	1,25	11,94267516	7464171,975	5971337,58
3	450000	900000	1,5	14,33121019	12898089,17	10318471,34
3,5	612500	1225000	1,75	16,71974522	20481687,9	16385350,32
4	800000	1600000	2	19,10828025	30573248,41	24458598,73