

État de l'art et synthèse sur la situation actuelle, perspectives des sources de production d'électricité hydraulique

Nous présentons l'état de l'art du domaine en regroupant l'ensemble des articles ou contenus d'ouvrages, que nous avons choisi pour commencer cette étude.

Dans le bilan que nous présenterons ensuite, nous donnerons les grands axes de recherche vers lesquels nous avons souhaité nous orienter à la lueur de cette étude. Ensuite, nous situerons notre étude dans le contexte national et international et nous tirerons les premières conclusions.

Ce chapitre présente les différentes technologies utilisées dans les petites centrales hydroélectriques, les caractéristiques et paramètres des micro-turbines et leur modélisation. Les résultats issus de cette étape permettront de choisir la structure de couplage mécanique de la microcentrale hydroélectrique pour la suite de cette thèse

CHAPITRE I

État de l'art et synthèse sur la situation actuelle, perspectives des sources de production d'électricité hydraulique

I.1. Notions générales sur les petites centrales hydroélectriques (PCH)

À côté des centrales de très forte puissance (installations sur des fleuves de plusieurs dizaines de MW) qui nécessitent de grands barrages complexes et coûteux et dont les impacts écologiques et humains sont très importants (modification des cours d'eau, ensablement, inondation de vallées et déplacement de population...), il est possible de produire de l'électricité à partir de petits cours d'eau et d'installations plus simples dites « au fil de l'eau » (simples prises d'eau sur rivières).

I.1.1. La définition d'une petite centrale hydroélectrique [Ade 06]

Une PCH se définit comme une installation de production énergétique, d'une puissance inférieure à 10 MW, transformant l'énergie hydraulique d'un cours d'eau en énergie électrique.

La petite hydroélectricité est une forme de production d'énergie répondant aux trois critères fixés dans la définition généralement admise pour les énergies renouvelables :

a. Pérennité des ressources

Les énergies renouvelables sont basées sur l'exploitation de flux naturels d'énergie : rayonnement solaire, cycle de l'eau, des vents, flux de la chaleur de la terre, effet de l'attraction lunaire et solaire sur les océans. Ce sont donc des énergies inépuisables à l'inverse des énergies fossiles et minières (charbons, pétroles, gaz naturel et uranium).

L'énergie hydroélectrique utilise presque exclusivement la partie « terrestre » du cycle de l'eau, c'est-à-dire celle qui concerne l'écoulement de l'eau entre l'arrivée à terre des précipitations (pluies et neiges) et le retour à la mer.

b. Respect de l'environnement

L'hydroélectricité n'a recours à aucune combustion. Elle n'émet donc aucun gaz pouvant concourir à l'effet de serre, problème majeur à l'échelle planétaire.

c. Possibilité de production décentralisée.

Le plus souvent, l'énergie hydroélectrique se trouve partout sur la terre. Elle représente une énergie décentralisée, même si les régions de production sont principalement situées en zone montagneuses et en zones rurales.

I.1.2. Les différents types de PCH

- Les centrales de haute chute : Dans ce cas, la puissance est principalement liée au fort dénivelé (hauteur de chute supérieure à 100 m) entre la prise d'eau et le rejet. La conduite est l'ouvrage le plus important de ce type de petite centrale.
- Les centrales de moyenne chute : La puissance est liée à la fois à la hauteur de chute et au débit turbiné. On trouvera notamment ce type de PCH dans le Massif Central.
- Les centrales de basse chute. La puissance dépend alors du débit turbiné. Il n'y a en règle générale pas de conduite forcée, ou celle-ci reste courte. L'ouvrage le plus important est le barrage ou la prise d'eau, le plus souvent construit en béton.

I.1.3. Classement des PCH

La notion de petite hydraulique est variable selon les pays. A l'heure actuelle, il n'y pas de définition internationale fixant les gammes de puissance des installations. Les notions de petite, mini et micro hydraulique sont présentes dans la littérature et certaines différences sont illustrées au **tableau 1.1** [Dra 01], [Pai 02].

Pays	Micro (kW)	Mini (kW)	Petite (MW)
USA	<100	100-1000	1-30
France	20-500	500-2000	2-10
Chine	5-5000	-	-
Inde	<100	101-1000	1-15

Tableau 1.1. Définitions de petite, micro, mini hydraulique

I.1.4. La part des PCH parmi les autres formes d'énergies renouvelables dans le monde

La micro-hydroélectricité est une technologie éprouvée et parvenue à maturité [Hem 99]. Idéale pour l'électrification des sites isolés, elle apporte un appoint à la production électrique nationale en cas de forte consommation. Une étude menée par l'European Small Hydraulic Association (ESHA) estime les ressources de potentiel de l'Union européenne encore disponible des microcentrales hydrauliques à 1700 MW.

Le **tableau 1.2** présente la part des petites centrales hydrauliques parmi les principales autres formes d'énergies renouvelables dans le monde [Dra 01].

Grande hydraulique (>10 MW)	86%
Petite hydraulique (<10MW)	8.3%
Éolien et Solaire	0.6%
Géothermie	1.6%
Biomasse	3.5%

Tableau 1.2 Production d'électricité à partir des énergies renouvelables.

I.1.5. Facteurs de rendements des différentes sources d'énergies renouvelables

L'hydroélectricité est largement acceptée comme une énergie propre et compatible avec les contraintes environnementales, mais cela n'a pas toujours été le cas à cause des importants ouvrages d'art que nécessite la mise en place des grands barrages (déviation de cours d'eau, inondations locales, déplacements de population, etc.). Au-delà du potentiel écologique, une comparaison basée sur un facteur de rendement fonction de l'installation montre que l'hydroélectricité reste la forme la plus rentable de production d'énergie. Ce facteur de rendement est le ratio entre la quantité d'énergie produite par l'installation pendant toute sa durée de vie et l'énergie requise pour la mise en place de l'équipement de production, y compris son alimentation. (Voir **Tableau 1.3**) [Dra 01].

Installation	Facteur de rendement
Petite hydraulique	80-100
Grande hydraulique	100-200
Photovoltaïque	3-5
Solaire (thermique)	20-50
Énergie Éolienne	10-30

Tableau 1.3 Facteur de rendement pour différentes centrales d'énergie

I.1.6. Principe de l'hydroélectricité

L'énergie d'un fluide peut se décomposer en :

- Énergie cinétique

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (1.1)$$

- Énergie potentielle

$$E_p = mgh \quad (1.2)$$

- Énergie de pression

$$E_{pres} = m \frac{p}{\rho} \quad (1.3)$$

Avec :

m (kg) = masse du fluide

v (m/sec) = vitesse du fluide

h (m) = hauteur de chute du fluide

g (m/sec²) = accélération de la pesanteur

p (Pa) = pression du fluide

ρ (kg/m³) = masse volumique du fluide

L'énergie totale par kg de fluide s'exprime donc par l'équation de Bernoulli, en introduisant une hauteur équivalente H utilisée par les Hydrauliciens :

$$\frac{E}{m} = \frac{v^2}{2} + hg + \frac{p}{\rho} = gH \quad (1.4)$$

La puissance hydraulique P_{hyd} se détermine à partir de l'expression de l'énergie :

$$P_{hyd} = \frac{E}{t} = \frac{gHm}{t} = gH \frac{mV_{ol}}{V_{ol}t} = \rho g H q \quad (1.5)$$

Avec :

V_{ol} (m³) = volume

q (m³/sec) = débit

H (m) = hauteur nette de la chute

La puissance hydraulique nette s'obtient en déduisant de H des pertes de charge existant dans les conduites forcées des canaux de dérivations, exprimées en mètre.

I.2. Microcentrales hydroélectriques: [Ade 06]

La micro-hydroélectricité est idéale pour l'électrification des sites isolés, elle apporte un appoint à la production électrique nationale en cas de forte consommation.

I.2.1. Les différentes composantes d'une microcentrale hydroélectrique

Une microcentrale hydroélectrique est composée de quatre éléments principaux :

- Les ouvrages de prise d'eau (digues, barrage)

La forme et les dimensions de cet ouvrage sont adaptées à la nature du terrain ou à la conformation du lit du cours d'eau. Il est construit en enrochements, en gabions en terre, en maçonnerie ou en béton. Il peut parfois tirer parti des faciès naturels et ne nécessite aucun aménagement.

La prise d'eau peut également être installée sur un canal d'irrigation ou sur une adduction d'eau potable.

- Les ouvrage d'amenée et de mise en charge (canal d'amenée, conduite forcée)

Un canal d'amenée, en terre ou en béton, et la conduite forcée le plus souvent en acier ou en polyéthylène dirigent l'eau vers la centrale. Le canal est muni d'une grille qui retient les corps solides charriés par le cours d'eau.

Éventuellement, un dessableur favorise le dépôt des particules avant l'entrée dans l'installation (protection contre les crues, isolement du canal, isolation de la turbine, etc.).

Une chambre de mise en charge si le canal d'amenée est à écoulement libre, ou une cheminée d'équilibre s'il s'agit d'une conduite forcée, assure la jonction avec la conduite forcée qui alimente en eau la turbine.

➤ Les équipements de production (turbines, générateurs, système de régulation)

Dans le cas d'une turbine à réaction par exemple, l'eau est guidée par le distributeur pour rentrer sans choc dans la roue. Celle-ci se met en vitesse maximale à la sortie de la roue, cette dernière transforme en énergie mécanique l'énergie fournie par l'eau. Il existe de nombreux types de turbines s'adaptant à différentes contraintes imposées par chaque site.

Un générateur produit l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique de la turbine. C'est en général un alternateur synchrone en réseau autonome et une génératrice asynchrone en réseau connecté pour des puissances inférieures à 1000 ou 2000 kW.

Un système de régulation pour adapter en permanence les variations, parfois brutales, du débit d'eau à la demande des consommateurs (en réseau isolé) et d'utiliser au mieux l'eau disponible (en réseau interconnecté).

Un bâtiment abrite toutes les installations de production et les tableaux de commande qui peuvent être contrôlés sur place ou pilotés à distance.

Une ligne d'évacuation transporte le courant électrique produit, soit à un réseau interconnecté, soit à un réseau isolé.

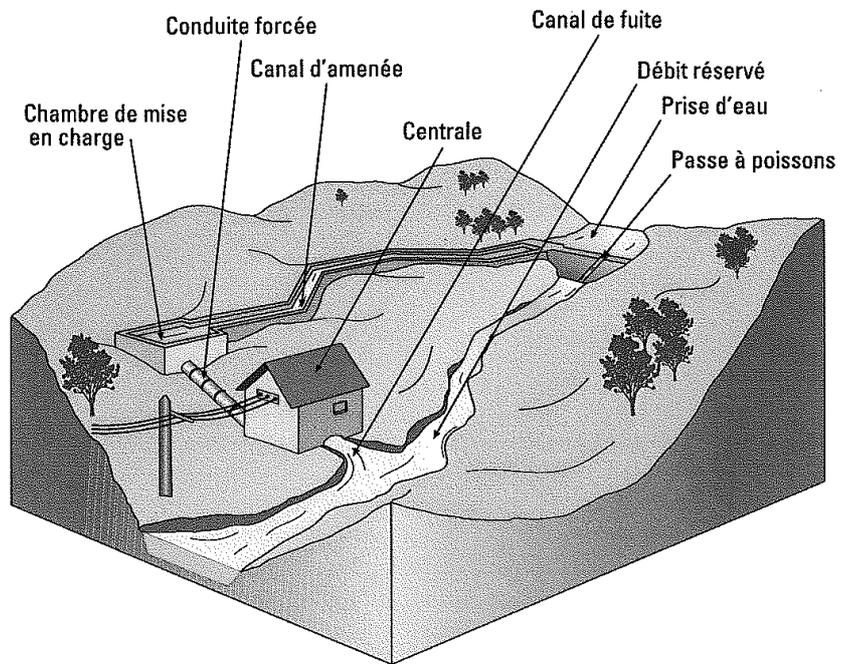
➤ Les ouvrages de restitution

A la sortie de la centrale, les eaux turbinées sont envoyées dans la rivière par un canal de fuite. Ce canal est établi soit à l'air libre, soit en galerie dans le cas où la centrale est souterraine. La longueur du canal de fuite est très variable selon le type d'aménagement.

Les schémas de la figure 1.1 représentent la structure classique d'une microcentrale hydraulique.

Les différentes composantes d'une PCH

Centrale de moyenne et haute chute



Centrale de basse chute

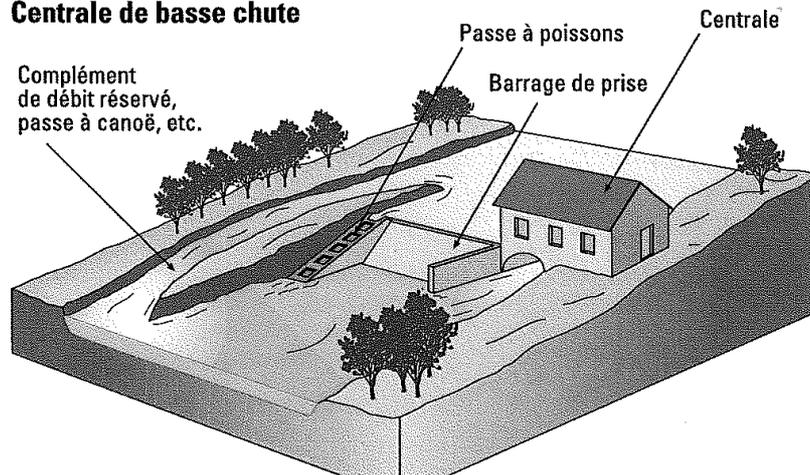


Figure 1.1. Les différentes composantes d'une petite centrale hydroélectrique [Ade 06]

Les performances d'une turbine hydraulique sont influencées par les paramètres de la colonne d'eau alimentant la turbine comme l'inertie et la compressibilité de l'eau, de même que l'élasticité intrinsèque de la canalisation. L'inertie de l'eau a pour effet de retarder la variation du débit suite à une variation de la section de passage de la vanne d'admission.

Des modèles plus précis de turbines hydrauliques font intervenir les influences de l'écoulement de l'eau comme la réflexion à travers la conduite d'amenée. La vitesse de propagation des ondes générées est d'environ 1200 m/s, ce qui n'est à prendre en compte que pour des canalisations très longues.

I.2.2. Les grandeurs caractéristiques de microcentrale hydroélectrique

Quatre grandeurs caractéristiques permettent d'évaluer l'importance d'un aménagement hydraulique :

- le débit d'équipement,
 - la hauteur de chute,
 - la puissance de l'aménagement,
 - l'énergie électrique produite.
- Le débit d'équipement (Q) est le débit maximum susceptible d'être turbiné par la centrale, c'est-à-dire le débit maximum absorbé par toutes les turbines lorsque celles-ci fonctionnent ensemble à pleine puissance. Il s'exprime en m^3/sec .
 - La hauteur de chute brute (H_b) est la différence d'altitude, exprimée en mètre, entre le niveau de l'eau à la prise d'eau (côté de surface libre en eaux moyenne) et le niveau de l'eau au droit de la restitution. Elle s'exprime en m.
 - La hauteur de chute nette H tient compte des pertes de charge hydrauliques dans les ouvrages d'amenée et de restitution. Elle s'exprime en m.
 - La puissance est une fonction combinée du débit d'équipement et de la hauteur de la chute. Elle est exprimée en kilowatts (kW) ou mégawatts (MW).

On distingue habituellement la puissance brute de la puissance nette.

- La puissance hydraulique brute s'exprime par la puissance potentielle

$$P_{hydb} = 9,81QH_b\rho \quad (1.6)$$

ρ : Masse volumique du fluide (kg/m^3)

- La puissance nette représente la puissance effective

$$P_{hyd} = 9,81QH\rho \quad (1.7)$$

I.3. Le contexte de la petite hydroélectricité en Europe et en France [Eur 08]

Dans quelle mesure la petite hydroélectricité pourrait-elle contribuer aux objectifs fixés par l'Europe en matière d'énergies renouvelables? Quelle part pourrait représenter l'hydroélectricité dans la production électrique française ?

Le rapport [Eur 08] rappelle le contexte de la petite hydroélectricité en Europe et en France.

1.3.1. Le contexte au sein de l'Union Européenne

Les interrogations et les inquiétudes concernant les conséquences environnementales de la production d'énergie électrique au moyen de combustibles fossiles ou radioactifs ont été propices au développement des énergies renouvelables et de la production décentralisée.

Ainsi, les pays de l'Union Européenne se sont engagés à baisser leurs taux d'émissions de gaz à effet de serre de 8%, avec un objectif établi pour la période 2008-2012. Cet engagement conjoint est également connu sous la domination de « bulle européenne ». A l'intérieur de cette bulle, chaque pays européen possède un objectif propre. Celui-ci prend en compte les spécificités de chacun, à savoir son taux d'émission de gaz à effet de serre, sa structure énergétique, ainsi que son activité économique. La France devra mettre en œuvre les moyens nécessaires et suffisants pour atteindre une consommation moyenne de 20% d'énergie finale d'origine renouvelables à l'horizon 2020 [Ade 09].

Dans ce contexte, l'hydroélectricité se place très favorablement car elle représente à elle seule 94,3 % de la production électrique mondiale à base d'énergies renouvelables.

En Europe occidentale, la grande hydroélectricité a quasiment atteint sa saturation alors que l'on estime à 1700 MW le potentiel d'évolution des petites centrales hydrauliques ; il est alors intéressant d'envisager le développement de micro turbines hydrauliques pouvant, par exemple, fonctionner au fil de l'eau ou en moteurs afin de réaliser un stockage d'énergie potentielle. De plus, en générateurs la petite hydraulique constitue la solution économique et environnementale la plus envisageable pour l'alimentation des sites isolés.

La petite Hydroélectricité est bien moins médiatique que d'autres filières, elle ne fait pas moins partie intégrante du système européen de production d'électricité renouvelable. Elle est notamment utilisée comme un appoint à la production électrique nationale en cas de pic de consommation. Elle contribue à la sécurité de l'approvisionnement tout en garantissant une certaine stabilité de prix.

Il existe de nombreuses incitations pour promouvoir le développement de la filière hydroélectrique européenne, tels les systèmes de tarif d'achat utilisés dans des nombreux pays comme

l'Allemagne, la France ou l'Autriche. Mais il existe aussi des contraintes réglementaires et environnementales. La directive-cadre dans le domaine de l'eau a conduit les États membres à revoir leur législation nationale afin d'assurer la préservation écologique des rivières. La filière de la petite hydraulique a donc dû s'adapter, en développant des installations et des technologies ayant le moins d'impact possible sur le milieu naturel (mise en place d'échelles à poissons, etc.). En tenant compte de ces contraintes, la petite hydroélectricité peut être une alliée de poids dans l'atteinte des objectifs de la directive européenne sur la production d'électricité d'origine renouvelable.

Le juste équilibre n'est cependant pas toujours simple à trouver, ce qui explique sans doute pourquoi le secteur se développe lentement. En 2007, le parc européen (puissance en fonctionnement) a connu une croissance de 2,2% (+276,9 MW), ce qui porte sa capacité totale à 12791,2 MW. La filière a permis la production de 38,8 TWh électriques, en légère baisse (1,4%) par rapport à 2006, année durant laquelle 39,3 TWh avaient été produits.

Les chiffres collectés auprès des différents pays montrent que le secteur de la PCH représente des volumes de plusieurs dizaines de milliers d'emploi, dont 9400 en Allemagne, 6660 en Espagne, 3900 en France et 1100 en Autriche.

L'Italie est l'État qui dispose toujours du parc de petit hydraulique le plus important au niveau européen. D'après TERNA (le gestionnaire du réseau électrique italien), il s'élève à 2522,3 MW en 2007, ce qui représente une augmentation de 2,2% par rapport à 2006. Malgré tout, la production est en baisse de 9,8%, puisque 7100,1 GWh ont été produits contre 7875 GWh l'année précédente. La petite hydroélectricité est éligible au système de certificat vert mis en place dans la péninsule. Ce dispositif oblige les producteurs et les importateurs à injecter de l'électricité d'origine renouvelable sur le réseau (4,55% en 2008). En Italie, pour les centrales de puissance inférieure à 1 MW, les installations peuvent bénéficier d'un tarif d'achat qui s'élevait, en 2008, à 22 c€/kWh.

I.3.2. Le contexte en France

I.3.2.1. La production totale d'électricité en France

En France, la production totale d'électricité est de 549,1 TWh en 2008 [Deg 09]. Elle se répartit en 418,3 TWh nucléaires (76,2%), 68,1 TWh hydrauliques (12,4%), 56,9 TWh thermiques classiques

(10,4%) et 5,7 TWh éoliens et photovoltaïques (1,0%). La figure 1.2 représente l'origine de la production d'électricité en France [Ade 06].

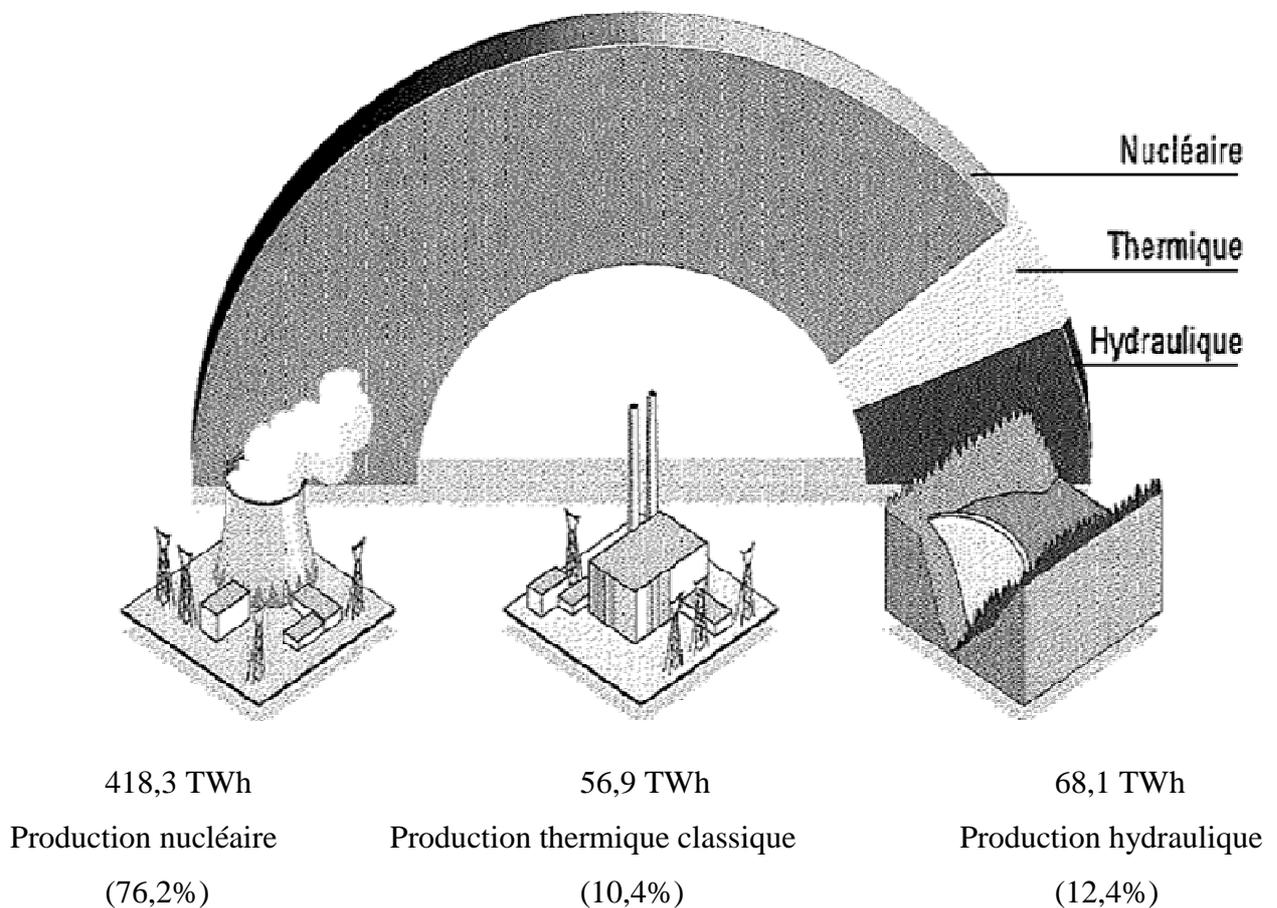


Figure 1.2. Production d'électricité en France [Ade 06]

I.3.2.2. La production des PCH en France

La France possède le deuxième parc de l'Union européenne avec, selon la direction générale de l'énergie, une puissance totale de 2060 MW en 2007. La production est en hausse de 2% par rapport à 2006 avec 6221 GWh produits. **En France** c'est l'arrêté du 1er mars 2007 qui définit le tarif d'achat de l'électricité applicable aux installations hydrauliques. Celui-ci s'élève à 6,07 c€/kWh, auxquels s'ajoute une prime comprise entre 0,5 et 2,5 c€/kWh pour les petites installations (<12 MW), et une prime comprise entre 0 et 1,68 c€/kWh en hiver selon la régularité de la production. La prime versée à la régularité de production existait déjà dans l'ancien système (elle a été définie par le décret du 25 juin

2001). En revanche, la mise en place d'une prime spécifique pour les petites installations est une véritable nouveauté.

En France, la production annuelle de la PCH est de 7,5 TWh, environ 10% de la production hydraulique et 1,5% du total de l'énergie nationale. Sur 250 kms de rivière, il y a 1700 PCH avec 1800 MW de puissance installée [Cle 94].

L'objectif, à l'horizon 2010, est de produire 12 TWh de PCH, avec 2800 MW de puissance installée [Ade 06].

I.3.3. Les activités d'une microcentrale hydroélectrique

L'installation d'une microcentrale hydroélectrique regroupe trois activités principales : le génie électrique, le génie mécanique et le génie civil. La turbine hydraulique convertit l'énergie de la chute de l'eau en énergie mécanique sur son arbre. La décision finale du choix de la turbine, de l'équipement électrique, du génie civil est déterminée par les potentialités du site et la puissance à installer.

I.3.4. Le choix de type de turbine d'une microcentrale hydroélectrique

En général, le choix du type de turbine dépend principalement du débit, de la hauteur de chute et de la vitesse de rotation de l'arbre. De plus, pour les installations où le débit est suffisamment constant tout au long de l'année, il est également possible d'utiliser des groupes turbopompes, ce système permettant de stocker une grande quantité d'énergie potentielle en amont de l'installation en heures creuses et de la restituer aux heures de forte consommation.

La figure 1.3 résume les domaines d'utilisation des turbines sur des courbes de débit, de hauteur de chute et de puissance.

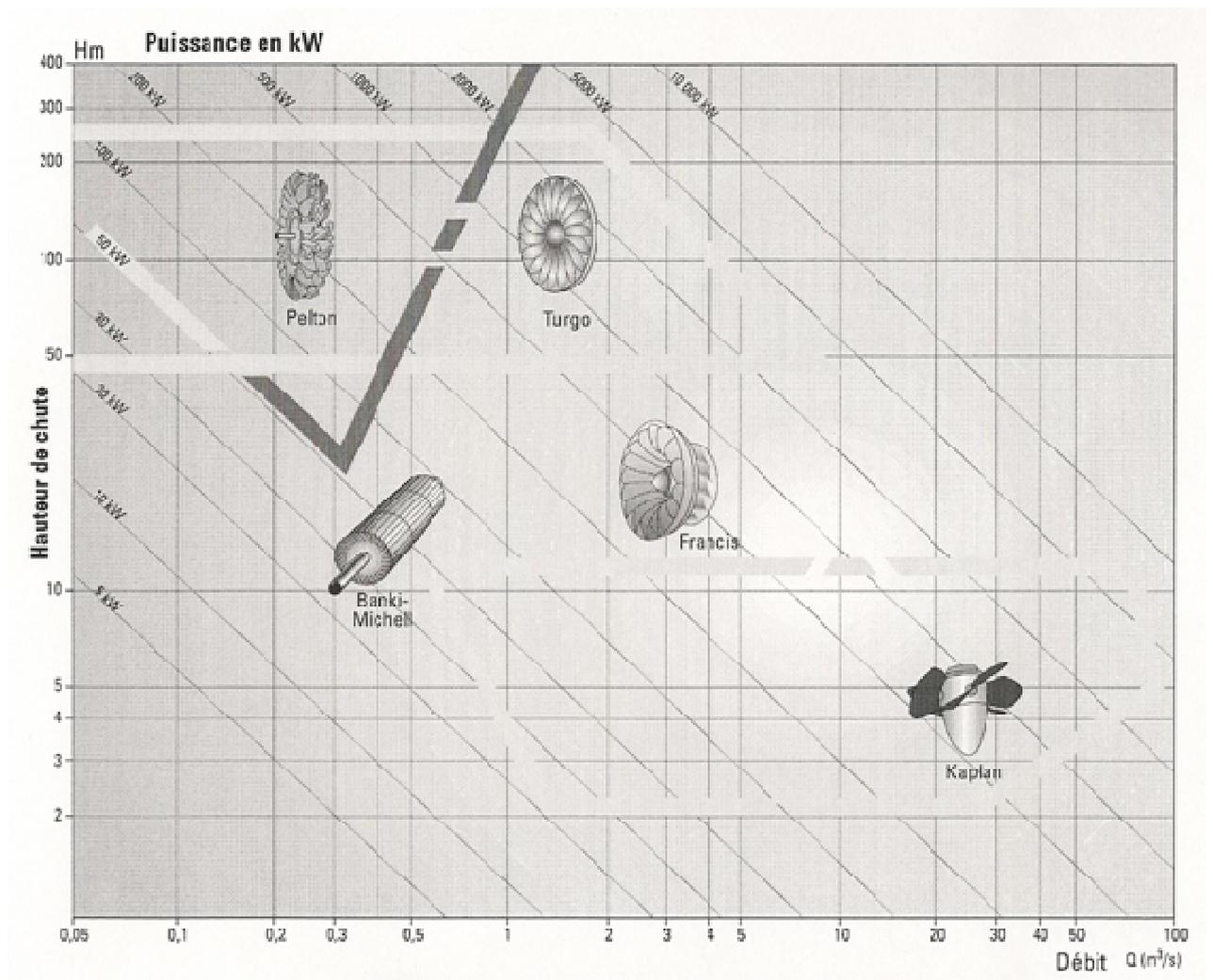


Figure 1.3 : Domaines d'utilisation des turbines dans les microcentrales. [Pac 95a]

Le tableau 1.4 [Pac 95a] permet de faire un premier classement pour identifier les types de turbines adaptées aux microcentrales hydroélectriques.

NOM	PELTON	CROSS FLOW	FRANCIS	KAPLAN
TYPE	Turbine à action : L'eau est mise en vitesse maximale dans l'injecteur. Toute l'énergie dans le jet entraîne la rotation de la roue et de l'eau ressort en pluie (énergie cinétique).		Turbine à réaction : L'eau est guidée par le distributeur pour rentrer sans choc dans la roue. Celle-ci se met en vitesse maximale à la sortie de la roue. Cette machine utilise à la fois l'énergie cinétique et la différence de pression.	
DEBIT	20 à 1000 L/sec	20 à 7000 L/sec	100 à 6000 L/sec	300 à 10000 L/sec
HAUTEUR	50 à 400 m	10 à 150 m	5 à 100 m	2 à 10 m
VITESSE DE ROTATION	500 à 1500 tr/min	Faible	Jusqu'à 1000 tr/min	Faible
CARACTERISTIQUES	Arrivée d'eau réglable par les injecteurs qui permettent de conserver de bons rendements. Encombrement réduit par liaison directe turbine-générateur.	Construction simple mais rendement relativement faible. Multiplicateur encombrant entre turbine et générateur	Excellent rendement si le débit varie entre 60 et 100% de son débit nominal. Fonctionnement sans multiplicateur.	Bon rendement. A utiliser pour les forts débits et les faibles chutes.

Tableau 1.4 Les quatre types principaux de turbines

I.3.5. Typologie des turbines:

Chaque machine est présentée par un tableau de données numériques exprimant toutes ses caractéristiques principales. Une coupe détaillée illustre les parties constituant la turbine.

I.3.5.1. Turbines à action : Turbines Pelton et Crossflow

Principe de fonctionnement :

Un jet d'eau agit sur des augets en forme de double cuillère placés à la périphérie de la roue. Ce jet exerce une force hydraulique sur l'auget en rotation, effort qui est converti en couple sur l'arbre de la turbine. La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage a lieu à pression constante, généralement la pression atmosphérique. La roue de la turbine est dénoyée et tourne dans l'air.

I. Turbine Pelton :

La turbine Pelton est constituée par une roue à augets qui est mise en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur. Les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue.

La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min, ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique.

La figure 1.4 présente schématiquement une turbine Pelton.

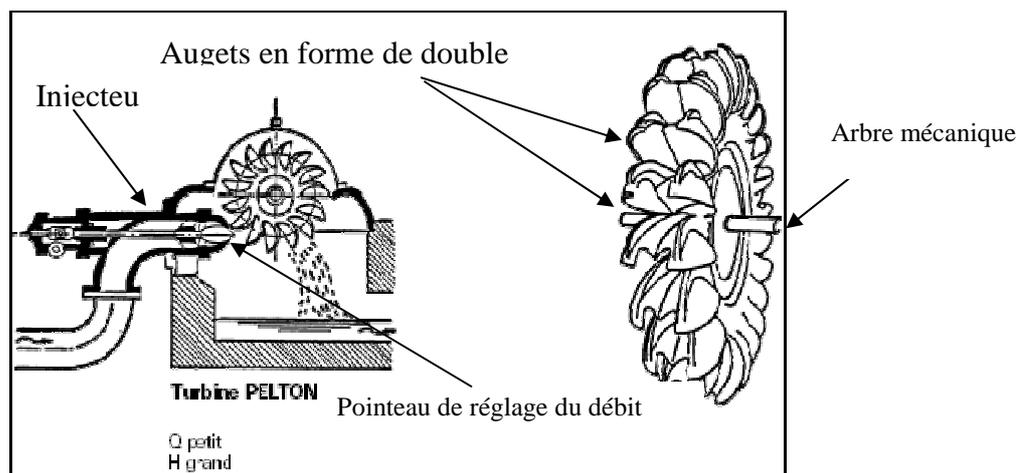


Figure 1.4 : Turbine Pelton [Pac 95]

II. Turbine Crossflow (ou Banki Mitchell):

La turbine Crossflow, appelé aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue. De construction simple, elle est constituée de trois parties principales

- Un injecteur de section rectangulaire et dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilée rotative, similaire à une vanne papillon.
- Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilée.
- Un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

La figure 1.5 représente la turbine Crossflow.

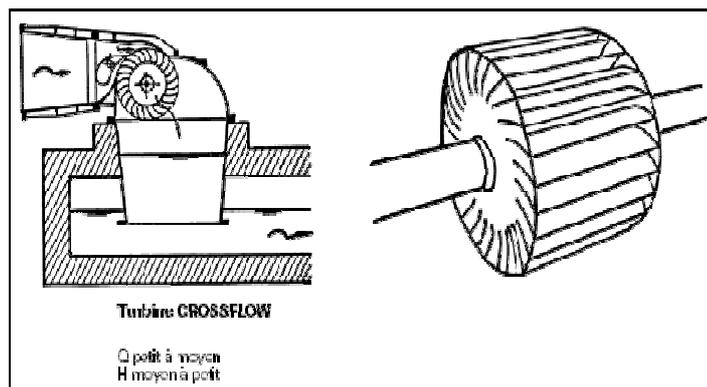


Figure 1.5: Turbine Crossflow [Pac 95]

En général sa vitesse de rotation est faible, ce qui justifie l'emploi d'un multiplicateur pour la coupler à une génératrice.

I.3.5.2. Turbines à réaction : Turbines Francis et Kaplan

Principe de fonctionnement :

Une turbine à réaction est une machine complètement immergée dans l'eau et mise en rotation par effet tourbillon au moyen d'une bêche en forme de spirale et des aubages directeurs fixes ou mobiles. Les aubages de la turbine sont profilés de manière à donner aux filets d'eau une direction

parallèle à l'axe de rotation à la sortie de la turbine. C'est à la fois l'énergie cinétique de l'eau et la différence de pression entre l'intrados et l'extrados des aubages qui génère le couple, contrairement aux turbines à action pour lesquelles seule l'énergie cinétique de l'eau est impliquée.

I. Turbine Francis :

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l.s-1 et 6000 l.s-1). Elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10m à 100m. Elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min).

La figure 1.6 représente la turbine Francis.

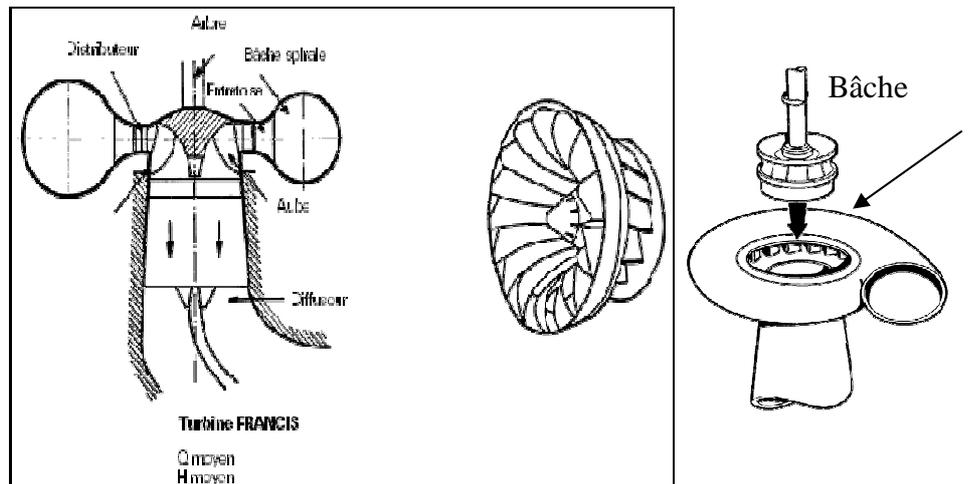


Figure 1.6 : Turbine Francis [Pac 95]

II. Turbine Kaplan :

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2m) et des débits importants de l'ordre de 300 l.s-1 à 15000 l.s-1. Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible.

La roue de la turbine Kaplan est semblable à une hélice de bateau et les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement η_t de la turbine.

La turbine Kaplan offre une analogie intéressante avec les turbines éoliennes sur l'aspect du réglage de l'orientation des pâles.

La figure 1.7 représente la turbine Kaplan.

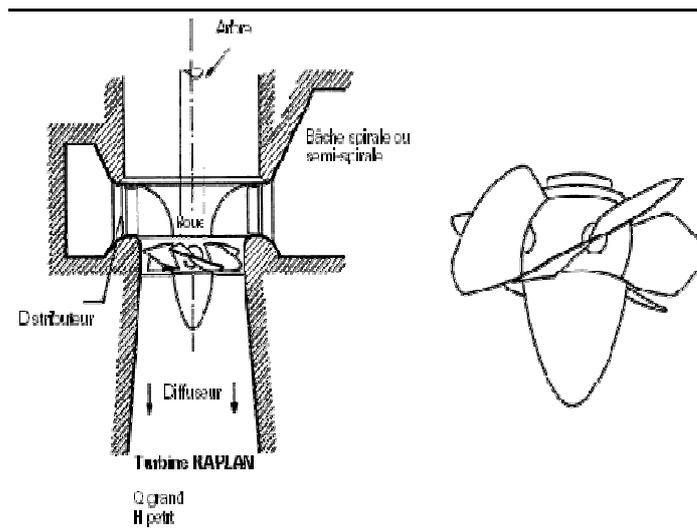


Figure 1.7: Turbine Kaplan [Pac 95d]

I.3.6. Le choix de type d'alternateur

Dans les microcentrales, on rencontre principalement :

- Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné

Elles restent les génératrices les plus utilisées pour générer une tension alternative sinusoïdale. Pour fournir une fréquence constante, il faut un système de régulation mécanique du débit d'eau permettant de maintenir une vitesse constante de la turbine.

Le rendement hydraulique global est diminué du fait des pertes de charge introduites par la vanne de régulation.

- Les machines asynchrones à cage débitant sur un réseau ou sur charge isolée.
Son utilisation reste encore limitée mais devrait rapidement évoluer du fait du coût relativement faible de la machine asynchrone par rapport à la machine synchrone. En fonctionnement autonome, la génératrice asynchrone pose des problèmes importants de stabilité en tension et en fréquence. Il faut des capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine, et le fonctionnement ne peut se faire qu'avec une plage de vitesse restreinte. Les charges utilisées ne doivent par conséquent pas être exigeantes en tension et en fréquence.
- Les Machines asynchrones à double alimentation
Actuellement, il existe très peu d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les microcentrales hydrauliques. Toutefois des exemples d'applications intéressantes existent dans les systèmes éoliens [Mul 02], [Kel 00] et son utilisation est envisagée dans l'aéronautique. Elle permet de pallier aux problèmes précédents de stabilité de la machine asynchrone à cage et autorise réellement un fonctionnement à vitesse variable. Une excitation auxiliaire fournie aux enroulements du rotor permet de contrôler la tension et la fréquence au stator. Cette structure sera étudiée dans le chapitre 2 de cette thèse.

I.3.7. Quelles perspectives pour la petite hydraulique ?

La petite hydraulique est une source d'électricité indispensable dans la conquête des objectifs définis par la directive européenne en termes de production énergétique d'origine renouvelable. Non-émettrice de CO₂, elle constitue une solution intéressante pour répondre aux objectifs européens de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'avenir de la filière dépend donc de la manière dont ces directives seront transposées et appliquées au niveau national.

D'après l'European Small Hydropower Association, qui regroupe les producteurs du continent, le potentiel de l'Union pour la petite hydraulique est encore considérable, en particulier dans la région des Balkans. La puissance du parc pourrait aussi augmentée grâce à la rénovation d'installations existantes. La croissance des capacités de production après réhabilitation peut être substantielle, sans pour autant nécessiter de démarches administratives trop contraignantes.

EurObserv'ER, dont la projection repose sur un taux de croissance annuel moyen de l'ordre de 1,7%, estime à environ 13450 MW la capacité européenne totale en 2010. L'objectif affiché dans le livre blanc est de 14000 MW. Pour l'atteindre, cela nécessiterait un taux de croissance annuel moyen de la filière de l'ordre de 3,1%.

I.4. Paramètres communs à toutes les turbines hydrauliques :

L'allure des courbes de rendements en fonction des débits et les caractéristiques couple vitesse est commune à toutes les catégories existantes de turbines hydrauliques.

I.4.1. Rendement des turbines hydrauliques

La figure 1.8 présente l'évolution du rendement rapporté au rendement maximum de la turbine en fonction du débit rapporté au débit maximal. La courbe 1 correspond à une turbine Pelton, la courbe 2 à une turbine Kaplan, la courbe 3 aux turbines Francis et Crossflow et la courbe 4 à une pompe inversée. On peut constater que le rendement est fortement variable avec le débit.

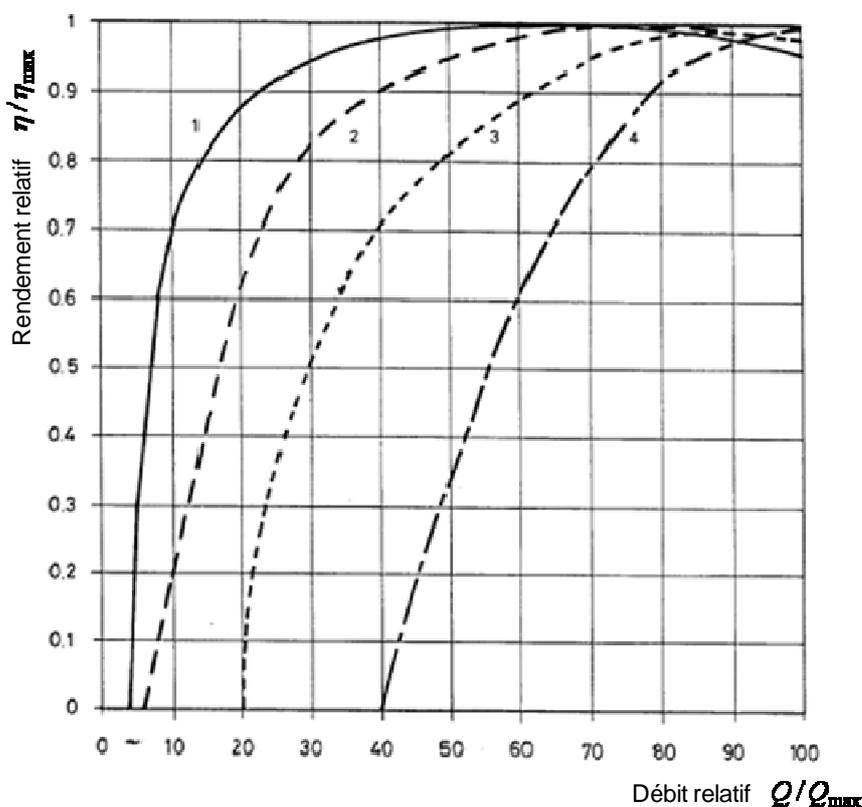


Figure 1.8. Formes des courbes de rendements de différentes turbines pour des débits variables [Pac 95]

La puissance mécanique P_{mec} se calcule à partir de la mesure du couple C_{mec} sur l'arbre de la turbine et de la mesure de la vitesse de rotation Ω du modèle

$$P_{mec} = C_{mec} \Omega \quad (1.8)$$

En définitive, le rendement hydraulique η_{hyd} est calculé par :

$$\eta_{hyd} = \frac{P_{mec}}{P_{hyd}} \quad (1.9)$$

I.4.2. Modèle simplifié d'une turbine hydraulique

Le modèle de turbine considéré est un modèle simple, statique, qui ne prend pas en compte certains paramètres hydrauliques tels que l'inertie et la compressibilité de l'eau, ainsi que l'élasticité de la conduite d'amenée à la turbine. Nous supposons que le débit de l'eau ainsi que l'orientation des aubes directrices et des pales, dans le cas d'une turbine Kaplan, sont constants. Sa caractéristique couple-vitesse est pratiquement linéaire comme représenté à la figure 1.9 où C représente le couple à débit constant délivré par la turbine et Ω , la vitesse de rotation [Pac 95].

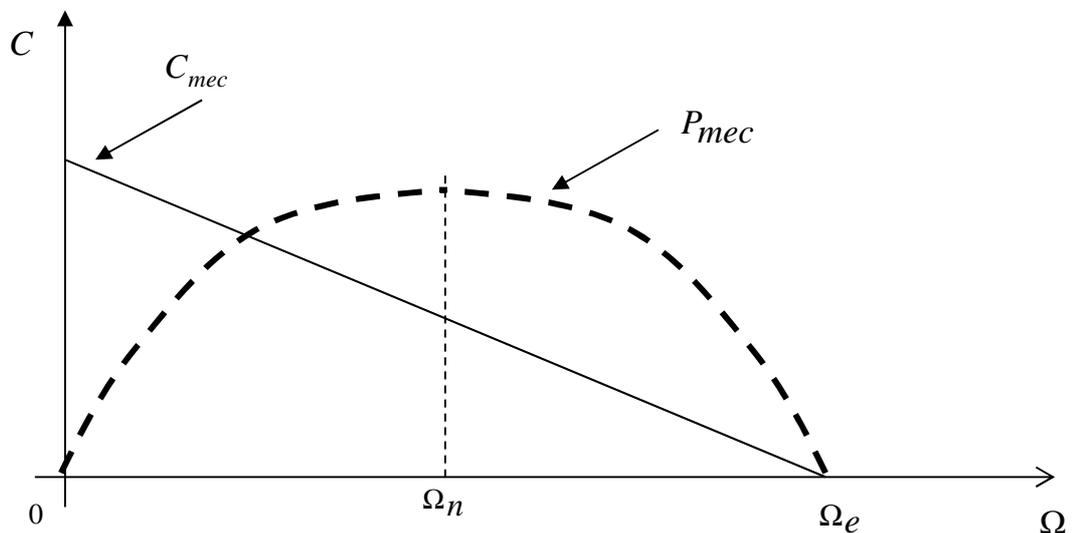


Figure 1.9: Caractéristique couple vitesse d'une turbine Kaplan [Pac 95]

L'allure de cette caractéristique, commune à toutes les catégories existantes de turbines hydrauliques, permet d'en déduire la puissance mécanique fournie, notée P_{mec} , est de forme parabolique. On distingue par ailleurs la vitesse d'emballement de la turbine Ω_e qui correspond à un

fonctionnement pour lequel le débit est non nul, mais aucune charge n'est connectée à la génératrice de sorte que le couple est nul. Cette vitesse d'emballement est comprise entre 1,8 et 3 fois la vitesse nominale. Les générateurs associés aux turbines hydrauliques doivent être dimensionnés pour résister à ces survitesses. L'équation de la caractéristique couple-vitesse de la turbine, sous débit et chute nominaux, est donnée ci-dessous (1.10), en considérant une vitesse d'emballement de la turbine étudiée égale à 1,8 fois la vitesse nominale:

$$C_{mec} = C_n \left(1,8 - \frac{\Omega}{\Omega_n} \right) \quad (1.10)$$

Le couple C_n est donné par les conditions de référence de l'installation i.e. la hauteur de chute nette nominale H et la vitesse de rotation nominale Ω_n cette dernière dépend des caractéristiques mécaniques de la turbine (vitesse spécifique).

La vitesse pour laquelle le couple mécanique s'annule est la vitesse d'emballement $\Omega_e = 1.8\Omega_n$ correspondant à un fonctionnement à vide de la turbine (Couple résistant nul).

Cette formule est valable pour un débit nominal Q_n constant et une hauteur de chute nominale H .

I.4.3. Choix de la turbine Kaplan

Notre choix s'est porté sur la turbine Kaplan comme générateur de couple mécanique sur l'arbre de la machine asynchrone. Les turbines Kaplan sont les plus appropriées pour le turbinage des basses chutes, critère important pour les microcentrales au fil de l'eau.

La turbine Kaplan à pales variables et distributeur fixe a un bon rendement pour des débits variant entre 30 et 100 %.

Elles ont des caractéristiques similaires à celles des éoliennes, comme par exemple le réglage de l'orientation des pales (pitch control), même si le principe de fonctionnement diffère légèrement.

I.5. Avantages, inconvénients et limites d'utilisation des turbines hydrauliques

La technologie des microcentrales hydroélectriques est très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables. Il s'agit, bien entendu, d'une énergie propre dans ce sens qu'elle ne génère, directement, aucune émission de gaz à effet de serre ni de polluants.

Elle engendre la création d'emplois locaux pour la gestion du fonctionnement des installations.

I.5.1. Avantages

Les microcentrales hydrauliques présentent plusieurs avantages parmi lesquels le fait qu'il s'agisse de la technologie la mieux maîtrisée des énergies renouvelables. En effet, on peut noter les critères suivants :

- Équipement caractérisé par sa grande robustesse, sa fiabilité et sa longue durée de vie ;
- Simplicité de l'entretien et frais de fonctionnement faibles ;
- Énergie propre dans ce sens qu'elle ne génère directement aucune émission nocive et ne nécessite aucun transport.

I.5.2. Inconvénients

Les micros centrales hydrauliques, si elles sont mal intégrées dans leur environnement, peuvent également présenter des impacts négatifs sur l'environnement pouvant générer des perturbations de diverses natures :

- Atteinte au paysage par l'aspect peu esthétique de la centrale, de la prise d'eau et de la conduite forcée ;
- Bruit généré par les turbines, le multiplicateur de vitesse de l'alternateur, le transformateur et l'écoulement de l'eau, pouvant provoquer une gêne pour le voisinage proche ;
- Prise d'eau pouvant entraîner une perturbation du régime de l'eau et de la relation nappes aquifères - rivières ;
- Installation pouvant constituer un obstacle à la migration des poissons.

Cependant, si la micro centrale est bien conçue, la plupart des atteintes à l'environnement peuvent être minimisées :

- En assurant le respect du débit réservé, qui par définition est un débit permettant de maintenir la vie aquatique malgré la présence d'une centrale hydroélectrique ;
- Par la mise en place de passes à poissons qui permettent aux poissons de remonter le cours d'eau
- En assurant l'intégration de la centrale 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. En effet, l'eau achemine des débris qui s'accumulent sur la grille destinée à protéger la turbine de ces éléments ; ainsi la fonction du dégrilleur est de retirer ces éléments qui pourraient endommager la turbine.

I.5.3. Limites d'utilisation des turbines hydrauliques à vitesse fixe

Cette technologie présente néanmoins quelques limites quant aux coûts d'investissement pouvant être assez importants pour certaines installations et à la nécessité d'avoir des sites appropriés en termes de cours d'eau et de chute.

Pour rentabiliser au mieux une centrale hydraulique, on a tout intérêt à produire le maximum d'électricité annuellement et faire fonctionner le générateur électrique le plus souvent possible avec des rendements maximaux. Si le débit de la rivière est plus faible que le débit optimal pour la turbine, la solution classique est un réglage mécanique du débit d'eau dans la turbine. On modifie le degré d'ouverture de la turbine (par action, notamment, sur les pales orientables des turbines Kaplan). On conserve ainsi un rendement élevé quel que soit le débit turbiné. Le problème intervient lorsque l'on couple la turbine au générateur électrique :

Si le générateur est une machine synchrone alors la vitesse de rotation de cette dernière est fixe et imposée par la fréquence du réseau 50 Hz. La régulation mécanique doit tenir compte de cette contrainte. Si le générateur est une machine asynchrone, alors, la variation de vitesse autour d'une vitesse synchrone reste relativement faible (5 à 10%). La solution économique pour le turbo alternateur est alors d'alimenter le rotor par un convertisseur délivrant une fréquence égale à la différence entre la vitesse de rotation et la fréquence du réseau. La puissance du convertisseur est réduite et est égale sensiblement à l'écart de vitesse en % multiplié par la puissance transmise au stator.

I.6. Proposition d'une structure

On considère un système de conversion d'énergie hydraulique connecté à un réseau de puissance ou à une charge isolée. Pour cela nous envisageons d'utiliser une machine asynchrone à double alimentation (MADA) couplée mécaniquement et électriquement à une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) de faible puissance.

Une turbine Kaplan associée à un multiplicateur de vitesse entraîne les deux machines (figure 1.10). La MADA reçoit l'énergie nécessaire à son excitation de la MSAP couplée sur le même arbre mécanique. La liaison électrique entre les deux machines est assurée par deux convertisseurs de puissance via un bus continu. Les deux convertisseurs MLI sont utilisés en mode back to back.

Le choix de cette structure se justifie par :

- Fonctionnement en autonome de la microcentrale hydroélectrique.
- la volonté de réduire la puissance transitant à travers les convertisseurs et donc leur coût.
- le coût des machines électriques : une installation avec génératrice synchrone à aimants permanents de même ordre de puissance nominale que la charge serait plus coûteuse.
- profiter des avantages qu'offre une génératrice à vitesse variable et à fréquence constante
 - adaptation aisée pour tout type de turbine (hydraulique, hydrolienne).
 - application possible sur une turbine hydrolienne en supprimant la régulation mécanique de la vitesse (actuellement utilisée).
 - Pour les turbines hydrauliques, on peut envisager la suppression des régulateurs hydromécaniques puisque le fonctionnement envisagé du système se ferait sous ouverture constante de la vanne de réglage du débit. Sous un débit variable, le couple fourni par la turbine dépend de sa vitesse de rotation. L'inconvénient serait cependant l'utilisation du système bague-balais.

Micro centrale hydroélectrique à vitesse variable envisagée

Le schéma proposé de la petite centrale hydro électrique est représenté dans la figure 1.10. Comme la plupart de ces usines, celle étudiée est considérée au fil de l'eau menant à l'utilisation d'une turbine hydraulique de Kaplan bien adaptée pour les basses altitudes. La turbine est associée à un multiplicateur de vitesse à cause de sa petite vitesse de rotation. La turbine entraîne une MADA dont

l'excitation de son rotor est fournie par le stator de la MSAP, via deux convertisseurs triphasés MLI et un bus continu. Les trois machines sont couplées sur le même axe mécanique. Le convertisseur 1 commande la tension du bus continu pour équilibrer la puissance active du stator de la MSAP et celle du rotor de la MADA. Le convertisseur 2 commande la MADA pour le fonctionnement sur charges isolées ou sur un réseau de puissance.

Ce type de schéma quand la machine synchrone est à rotor bobiné est appelé commande statique de Kraemer [Kel 00]. Il mérite d'être noté qu'une structure similaire est également envisagée dans le domaine aéronautique pour l'alimentation du réseau électrique de l'avion [Kha 03] : la turbine hydraulique est alors remplacée par un moteur à réaction. On peut souligner que le schéma proposé est différent de celui d'une configuration classique dont le rotor et le stator de la MADA sont reliés via deux convertisseurs MLI.

Les articles [Ans, 06a] et [Ans, 06b] traitent le modèle, la structure du système et son fonctionnement sur charges isolées où la fréquence et la tension efficace du stator de la MADA sont régulées.

La figure 1.10 représente schématiquement la microcentrale hydro électrique à vitesse variable.

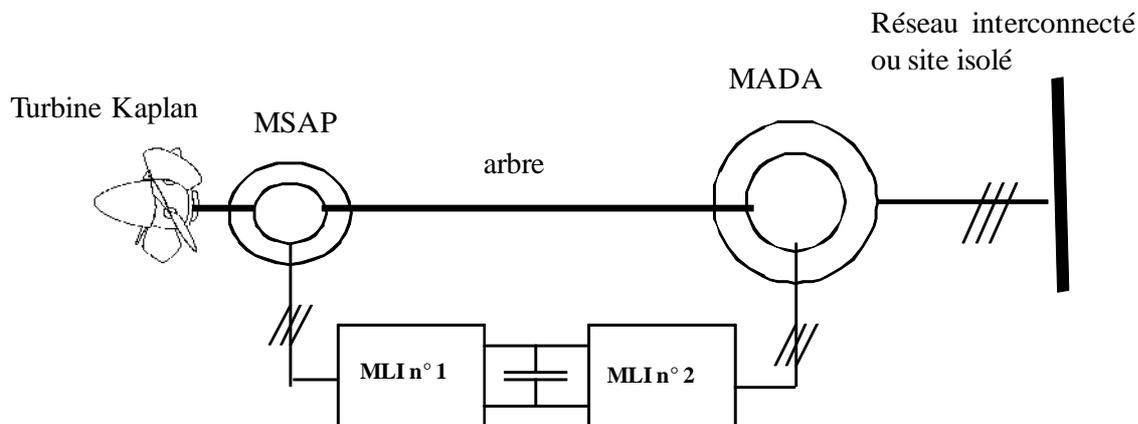


Figure 1.10. Schéma d'une micro centrale hydro électrique à vitesse variable

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, l'état de l'art actuel des microcentrales, les turbines hydrauliques et leur principe de fonctionnement ont été présentés. Il en ressort que les microcentrales offrent des perspectives intéressantes pour l'avenir de la production décentralisée d'énergie électrique. Les turbines hydrauliques « classiques » offrent des perspectives intéressantes du fait du coût du génie civil particulièrement faible et d'une forte intégration dans divers fleuves ou rivières. Pour les microcentrales au fil de l'eau, les turbines Kaplan sont les plus appropriées pour les basses chutes et autorisent un pitch control (orientation des pales) comme les éoliennes.

L'analyse issue de ce chapitre a permis de proposer une structure originale de couplage mécanique de la microcentrale hydroélectrique. Nous verrons en détail dans le chapitre suivant, la modélisation et la simulation de cette source hydroélectrique.

I.8. Bibliographie

- [Ade 06] ADEME, « Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité », formation Hydro, Grenoble, session du 19 au 22 septembre 2006, pp. 6-17.
- [Ade 09] ADEME/DER, « Eco technologies pour le futur »: S. Biscaglia, LILLE 10 et 11 juin 2009
- [Ans 06a] A. Ansel, B. Robyns, “Modelling and simulation of an autonomous variable speed micro hydropower station” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 71, n°. 4-6, pp. 320-332, June 2006.
- [Ans 06b] A. Ansel, B. Robyns, “Small hydroelectricity: from fixed to variable speed electromechanical drives,” *Electromotion*, vol.13, n°2, April 2006 pp. 111-126.
- [Cle 94] CLER (Comité de liaison des Énergies renouvelables, 1994) « Le potentiel des PCH en France ».
- [Dge 09] DGEC, « Électricité en France, principaux résultats en 2008 » DGEC (Direction Générale de l'Énergie et du Climat), 05 Juin 2009.
- [Dra 01] C. Dragu, T. Sels, R. Belmans, “Small Hydro Power – State of the Art and Applications”, *International Conference on Power Generation and Sustainable Development*, (AIM), Liège, Belgium, October 8-9, 2001; pp. 265-270.
- [Eur 08] EurObservER report 2008, « États des énergies renouvelables en Europe ». Edition 2008, pp. 30-35.

- [Hém 99] G. Hemery, J. Coulon, “Centrales hydroélectriques et apport de la vitesse variable”, Revue de l'Électricité et de l'Électronique, Décembre 1999, pp. 46-52.
- [Kel 00] C. R. Kelber and W. Schumacher, “Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machines,” VSSH y 2000 - European Conference Variable Speed in Small Hydro; Grenoble, France; 26-28 January 2000.
- [Kha 03] F. Khatounian, E. Monmasson, F. Berthereau, E. Delaleau and J.P. Louis, “Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application,” IECON 2003, Roanoke, Virginia, United States, 2-6 november 2003, pp. 2709-2714.
- [Mul 02] S. Müller, M. Deicke, R.W. De Doncker, “Doubly fed induction generator systems for wind turbines”. IEEE. Industry Applications magazine, May-June 2002, pp. 26-33.
- [Pac 95] Rapport (PACER), en Suisse “Petites centrales hydrauliques –le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine”, 1995.-ISBN 724.747.f
- [Pac 95a] Rapport (PACER), en Suisse “Petites centrales hydrauliques, le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine”, 1995.-ISBN 3-905232-55-3.
- [Pai 02] Oliner Paish, “Small Hydro Power: Technology and Current Status”« Renewable and Sustainable energy reviews ». February 6, 2002