

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN - ARCHITECTURE ET CLIMAT
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE – LESO-PB
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE - GRECAU

**MASTER OF ADVANCED STUDIES (MAS)
EN ARCHITECTURE ET DEVELOPPEMENT DURABLE**

TRAVAIL DE MAITRISE

**GUIDE POUR LA REHABILITATION DES MOULINS HYDRAULIQUES
EN VUE DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE**

Réalisé à l'Université de Bretagne-Sud

et

Présenté à LOUVAIN-LA-NEUVE

par

HESCHUNG Michel

Ingénieur

Ecole Nationale Supérieure des Techniques
Industrielles et des Mines d'Alès

Accepté sur proposition du jury
à Louvain-la-Neuve
le 14 décembre 2007

M. Jacques CLAESSENS
Prof. Alain CHATELET
Prof. André DE HERDE
Dr. Darren ROBINSON
Mlle Paola TOSOLINI

Remerciements :

Je tiens à remercier tous ceux qui, par leurs conseils et leur soutien, m'ont permis de mener à bien cette étude, en particulier :

- le Professeur Anton SCHLEISS, de l'EPFL, le promoteur de ce projet.
- M. Jean Bernard GAY, ancien enseignant de l'EPFL, pour sa disponibilité et la qualité des informations qu'il a bien voulu me transmettre au sujet des machines hydrauliques.
- M. Jean-Marie PINGAULT, de la Fédération Française des Amis des Moulins, qui m'a communiqué, sans compter son temps, des informations inestimables concernant la réglementation des moulins.
- M. Richard HUBERT, de la société Ritz-Atro, pour le temps qu'il a bien voulu me consacrer, et les installations hydrauliques qu'il m'a fait découvrir.
- M. Michel FONFREDE, l'inventeur passionné d'une machine hydraulique, pour sa contribution à cette étude.
- M. André TCHIFTCHIBACHIAN, du CEMAGREF d'Aix en Provence, pour les documents capitaux qu'il a bien voulu mettre à ma disposition.
- M. Thierry CLAUSS, de l'ONEMA 67, pour ses informations passionnantes sur le milieu aquatique.
- M. et Mme FLAGEUL, propriétaires du Moulin de Kerbihan, dont le soutien et l'enthousiasme m'ont stimulé durant cette étude.

Je remercie enfin mon épouse et mes enfants pour leur compréhension et leur soutien tout au long de ce travail.

Avertissement : le présent document est une version revue et corrigée du mémoire présenté le 14.12.2007 à Louvain-la-Neuve.

Sommaire

I. Introduction, présentation et justification de l'étude :	3
1. Les moulins, de l'essor au déclin :	3
2. La nouvelle donne énergétique :	4
3. Vers une renaissance des moulins :	5
4. Les points forts des petites installations hydroélectriques :	5
5. Les atouts de la rénovation :	6
6. Les objectifs de l'étude :	6
II. Présentation des aménagements hydrauliques :	8
1. Quelques données générales	8
2. Typologie des ouvrages	8
3. Constitution de la centrale	9
4. Puissance disponible	10
III. L'aspect réglementaire :	11
1. Les aménagements bénéficiant d'une autorisation sans limitation de durée :	11
2. L'autorisation administrative :	15
IV. La ressource hydraulique :	16
1. Le débit :	16
2. La hauteur de chute :	19
3. Puissance et production d'énergie :	20
V. Les ouvrages :	22
1. Le barrage :	22
2. Les organes associée :	25
VI. Les moteurs hydrauliques :	27
1. Les turbines hydrauliques :	28
2. Les roues à aubes :	33
3. Les vis hydrodynamiques :	36
4. Quelques compléments d'information :	36
VII. Les multiplicateurs de vitesse :	38
1. Les multiplicateurs à poulies et courroies :	38
2. Les multiplicateurs à engrenages :	39
VIII. Les génératrices :	40
1. La génératrice synchrone ou alternateur :	40
2. La génératrice asynchrone :	41
IX. La mise en œuvre des génératrices :	44
1. Fonctionnement en réseau autonome :	44
2. Fonctionnement en parallèle avec le réseau :	45
3. Cas particulier des alternateurs à aimants permanents :	46
4. Synthèse :	47
5. Les équipements associés :	47

X. Automatisation et conduite de la centrale :	50
1. L'automate programmable :	50
2. Les dispositifs de télésurveillance :	51
3. La conduite de l'installation :	53
XI. Le raccordement au réseau de distribution :	54
1. Raccordement au réseau en vue de la vente de l'électricité :	54
1-1. La déclaration d'exploiter :	54
1-2. Le raccordement au réseau public de distribution :	55
1-3. La vente de l'énergie produite par la centrale :	58
2. Raccordement au réseau avec consommation de la totalité de la production :	61
XII. L'aspect environnemental :	62
1. Impacts négatifs :	62
2. Impacts positifs :	63
3. Pistes de réflexion et d'amélioration :	64
XIII. L'aspect humain :	67
1. Prise en compte des effets négatifs :	67
2. Développement des points positifs :	67
XIV. L'aspect patrimonial et architectural :	69
XV. L'aspect économique :	70
1. Le coût de la réhabilitation :	70
2. Les aides et les subventions :	72
3. La fiscalité liée à la vente d'énergie :	73
XVI. La conduite du projet :	74
1. La pré-étude :	74
2. L'étude de faisabilité :	75
3. La finalisation du projet :	76
XVII. Dossiers :	77
1. Dossier 1 : Le Moulin de St Yves :	77
2. Dossier 2 : La microcentrale de Steinbourg :	83
XVIII. Conclusion et perspectives :	88
Fiches :	90
Glossaire :	106
Bibliographie :	107
Liste des sites Internet :	108

I. Introduction, présentation et justification de l'étude :

Au milieu du XIX^e siècle, plus de 100 000 moulins hydrauliques dispensaient généreusement une énergie abondante et indéfiniment renouvelable, au fil des cours d'eau de France. En raison du développement du réseau électrique, au cours du XX^e siècle, ces installations ne furent plus compétitives et cessèrent leur activité les unes après les autres, puis, pour plusieurs, disparurent.

Au XXI^e siècle, alors que l'humanité est à la recherche de sources d'énergie de proximité, non polluantes et non tributaires de réserves limitées, les moulins hydrauliques pourraient-ils être à nouveau de la partie ? Et, dans l'affirmative, comment procéder à la réhabilitation de ces vénérables ouvrages ?

1. Les moulins, de l'essor au déclin :

Les premiers moulins à eau apparurent durant l'Antiquité, dans les pays du pourtour méditerranéen. Dès le I^{er} siècle avant JC, l'architecte romain Vitruve décrit un moulin actionné par une roue à aubes verticale.

Initialement destinés à moudre le grain, d'où leur nom, les moulins mirent à la disposition de l'homme une énergie remarquable par sa puissance et sa disponibilité.

Ces ouvrages connurent un développement considérable au Moyen-âge, principalement à partir du XI^e siècle. L'invention de la came, qui permet de convertir un mouvement de rotation en un mouvement de translation, a entraîné la mécanisation d'un grand nombre d'activités : les roues à aubes actionnèrent les soufflets et les marteaux des forges, entraînèrent les scies, permirent de fouler les tissus, de préparer la pâte à papier,.....

A cette époque, les moulins du Nord de la France étaient essentiellement munis de roues à aubes verticales, tandis qu'au Sud, principalement dans les régions montagneuses, les roues horizontales furent privilégiées.

Bien que certaines roues aient développé jusqu'à 37 chevaux, la puissance de la plupart de ces installations restait modeste, inférieure à la dizaine de chevaux.



Doc. Ményret

Roue à aubes horizontale.

Le XIX^e siècle fut véritablement l'âge d'or des moulins : vers 1850, on dénombra plus de 100 000 moulins en activité en France. En dépit du développement de la machine à vapeur, les industriels exploitèrent intensivement l'énergie hydraulique, inépuisable et gratuite, pour actionner les machines de leurs ateliers. Ainsi, dans certaines régions, on assista à de véritables ruées vers les moulins : des entrepreneurs s'arrachèrent les aménagements disponibles pour y développer leur activité.

L'invention des turbines, à partir de 1830, permit d'exploiter des hauteurs de chute inaccessibles aux roues à aubes et de développer des puissances inconnues jusqu'alors. Par la suite, de nombreux moulins abandonnèrent leurs roues au profit des turbines, plus robustes, de meilleur rendement et insensibles au gel.

Cependant, l'avènement de l'électricité bouleversa radicalement la donne : il devint dès lors possible de transporter l'énergie à distance plutôt que de devoir l'utiliser sur le lieu même de sa production. Aussi s'orientait-on, dès l'aube du XX^e siècle, vers une production centralisée de l'électricité, exploitant rationnellement et à moindre coût les ressources hydrauliques importantes.

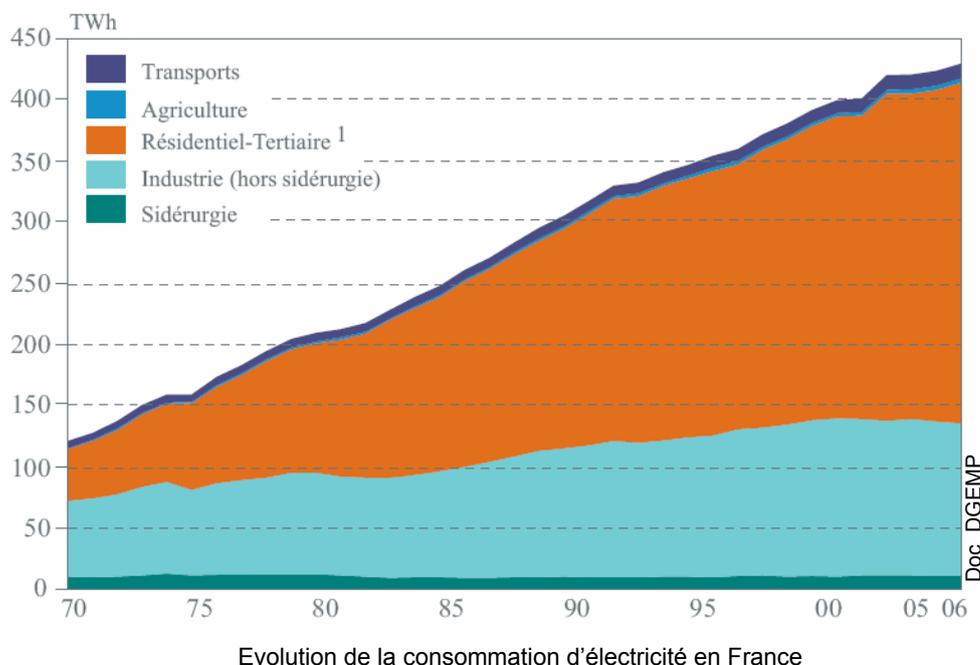
Bien que de nombreux moulins fussent alors convertis en microcentrales hydroélectriques, le développement du réseau électrique et la diffusion à grande échelle des moteurs électriques sonnèrent le glas des petites installations : les contraintes imposées par leur surveillance et par l'entretien de leurs ouvrages engendraient des coûts nuisant fortement à leur compétitivité.

De plus, par leur production liée au cycle annuel des cours d'eau et soumise aux aléas climatiques, tels que les inondations ou les périodes de sécheresse, elles ne pouvaient rivaliser avec le réseau de distribution électrique en termes de disponibilité et de qualité de l'énergie.

Aussi, l'activité des moulins déclina vers la fin des années 40, et même un bon nombre de microcentrales cessèrent leur production. De nombreux moulins furent alors abandonnés ou convertis en habitations, et leurs ouvrages hydrauliques démantelés.

2. La nouvelle donne énergétique :

Depuis lors, la consommation d'électricité en France a connu une croissance spectaculaire, passant de 151 TWh¹ en 1973, à 430 TWh en 2006. Le secteur résidentiel et tertiaire a connu une progression particulièrement importante, du fait de la grande diffusion des appareils tels que les ordinateurs, les téléviseurs, les chaînes HiFi,..... Bien que ces dispositifs soient de plus en plus sobres, l'augmentation de leur nombre et certaines mauvaises habitudes, comme le maintien en marche ou en veille des appareils non utilisés, entretiennent cette tendance.



Pour répondre à cette forte progression de la demande d'électricité, EDF dut développer son parc de centrales thermiques et nucléaires.

Les premières, grandes consommatrices d'énergies fossiles (charbon, fioul, gaz), participent à l'émission de dioxyde de carbone, le principal responsable du dérèglement climatique, aujourd'hui reconnu par tous.

Les centrales nucléaires, qui produisent actuellement 80% de l'énergie électrique consommée en France, présentent l'avantage de ne pas rejeter de gaz à effet de serre. Elles produisent néanmoins des déchets bien embarrassants pour les générations futures, exploitent des ressources limitées d'uranium, et élèvent la température des cours d'eau qui alimentent leurs circuits de refroidissement.

Par ailleurs, cette production fortement centralisée génère d'importantes pertes dans les lignes de transport : 13 milliards de kWh par an, l'équivalent de la consommation de 4,3 millions de foyers² !

Aussi, la France s'est-elle engagée à développer les énergies renouvelables qui devraient couvrir d'ici 2010, 21% de la consommation nationale d'électricité.

Dans cet ordre d'idées, M. Dambrine, Haut fonctionnaire de développement durable, a remis au Ministère de l'économie et des finances, en mars 2006, un rapport³ portant sur les perspectives de développement de l'hydroélectricité en France.

Or ce document fait précisément état du potentiel des moulins : la réhabilitation, en vue de la production d'électricité, des 30 000 moulins d'une puissance de 10 à 100 kW susceptibles d'être remis en service, assurerait une production annuelle d'un Milliard de kWh, soit l'équivalent de la consommation de 330 000 foyers.

¹ 1 TWh = 1 Milliard de kWh.

² Selon l'ADEME, la consommation moyenne annuelle d'un foyer, hors chauffage, eau chaude sanitaire et cuisson, représente 3000 kWh.

³ Rapport Dambrine, consultable sur le site de la DGEMP : www.industrie.gouv.fr/energie.

3. Vers une renaissance des moulins :

Diverses évolutions rendent à nouveau ces petites installations intéressantes :

- Par le passé, la ligne officielle préconisait souvent l'effacement des petits ouvrages hydrauliques, dont l'intérêt n'était plus évident, afin d'assurer la renaturation des rivières et la libre circulation de l'eau, des sédiments et de la faune aquatique. De ce fait, des propriétaires souhaitant réhabiliter leur moulin ont pu subir de vives oppositions de la part de certains organismes chargés de la protection du milieu aquatique. La nécessité actuelle de développer les énergies renouvelables pour lutter contre le dérèglement climatique et assurer une production décentralisée d'énergie a heureusement entraîné une évolution favorable des mentalités.
- Au cours du XX^e siècle, de nombreuses microcentrales ont cessé leur production en raison de coûts de fonctionnement excessifs, principalement liés à la surveillance de l'installation. Le développement des systèmes automatisés, couramment utilisés dans l'industrie, permet maintenant de faire fonctionner une centrale sans aucune surveillance humaine. En fonction de la disponibilité de la ressource en eau, la centrale pourra automatiquement démarrer, optimiser sa production et s'arrêter. Grâce aux nouvelles techniques de communication, il est par ailleurs tout à fait possible de surveiller à distance le fonctionnement d'une installation, de suivre l'évolution de sa production, de diagnostiquer ses dysfonctionnements, et même de commander sa mise en marche ou à l'arrêt à partir d'un simple téléphone portable !
- Avant 2001, le prix d'achat de l'électricité par EDF était faible et ne permettait pas de rentabiliser une petite installation. La loi du 10 février 2000, relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité, et ses différents arrêtés d'application, définissent le cadre de l'obligation d'achat de l'électricité produite à partir des sources renouvelables et garantissent une meilleure valorisation de l'énergie hydroélectrique.

4. Les points forts des petites installations hydroélectriques :

Les microcentrales hydroélectriques bénéficient des différents points forts de leur filière :

Elles exploitent l'énergie des cours d'eau, liée au cycle naturel de l'eau, gratuite et indéfiniment renouvelable.

Elles produisent de l'électricité sans libérer de gaz à effet de serre ou de particules polluantes dans l'atmosphère, sans rejeter de polluants dans l'eau (par exemple en Suisse, des installations hydroélectriques turbinent l'eau potable) et sans générer de déchets.

Le profil annuel de leur production, qui est lié au débit des cours d'eau, abondant en hiver et plus faible en été, est bien en phase avec celui de la consommation d'électricité.

Cette production est par ailleurs prévisible ; bien qu'elle évolue au fil des saisons, elle n'est pas affectée par les intermittences inhérentes à l'énergie d'origine photovoltaïque ou éolienne.

Les petits aménagements, qui sont bien répartis sur le territoire, produisent l'électricité à proximité du lieu même de sa consommation. Ils évitent ainsi des pertes dans les lignes de transports, indissociables d'une production fortement centralisée.

Sur les sites isolés, elles peuvent être une alternative très intéressante à l'extension du réseau électrique, tant du point de vue financier qu'environnemental.

Certaines centrales améliorent la qualité l'eau en retirant les déchets flottants du cours d'eau.

Les petites installations hydroélectriques peuvent être un outil intéressant de développement local : leur réhabilitation, puis leur maintenance, peuvent stimuler l'activité des entreprises et permettre des partenariats intéressants entre les producteurs et les établissements d'enseignement. Par les taxes et les redevances qu'elles génèrent, elles assurent également des ressources aux communes.

Enfin, les microcentrales se situent à l'intersection de la production d'une énergie propre et d'un milieu sensible, le cours d'eau. Elles peuvent ainsi devenir de remarquables outils de communication quant aux énergies renouvelables, aux économies d'énergie et à la protection de l'environnement.

5. Les atouts de la rénovation :

La transformation des moulins en vue de la production d'électricité et la réhabilitation d'anciennes microcentrales présentent également de multiples atouts par rapport à la construction de nouveaux aménagements hydrauliques :

La création, la réhabilitation et l'exploitation des centrales hydrauliques sont encadrées par une législation stricte visant à préserver les cours d'eau d'une industrialisation sauvage et à protéger l'environnement. La procédure administrative aboutissant à la création d'une nouvelle centrale est longue (2 à 6 ans), complexe et onéreuse.

Au contraire, les aménagements de petite puissance existant avant 1919 bénéficient d'une réglementation permettant d'envisager une remise en service dans des conditions favorables.

La construction d'une nouvelle centrale sur un site vierge implique d'importants travaux, tels que la création des voies d'accès, la construction d'un barrage et du bâtiment de la centrale, le raccordement de l'installation au réseau électrique,.... Ces travaux représentent un coût considérable, prohibitif pour une installation de petite puissance.

En revanche, sur un aménagement à rénover, la plupart de ces infrastructures existent. Leur réhabilitation ne nécessite qu'un investissement réduit, garant de la viabilité financière du projet.

Les travaux de construction d'une nouvelle centrale peuvent avoir un impact considérable sur l'environnement et générer diverses nuisances. De ce fait, ils suscitent souvent des réactions négatives de la part des usagers des cours d'eau et des protecteurs de l'environnement.

A l'opposé, la rénovation bien pensée d'une centrale n'aura qu'une portée limitée et permettra même améliorer l'impact global de l'aménagement sur l'environnement : une centrale exemplaire sera équipée d'un dispositif assurant le passage des poissons et des sédiments, même en l'absence d'obligation légale. De même, la rénovation des ouvrages anciens permettra de fiabiliser et de sécuriser ceux-ci, et fournira à ses propriétaires une motivation pour assurer l'entretien des berges.

Une réhabilitation bien étudiée permet également de préserver et de valoriser un patrimoine architectural et industriel intéressant. Les moulins et les ouvrages hydrauliques associés sont les témoins des techniques et du savoir faire des générations passées. Il serait regrettable que le temps et la négligence de certains propriétaires effacent ces témoignages.

Redonner à ces installations une finalité en accord avec les besoins contemporains et leur associer une rentabilité financière, permet d'assurer leur pérennité.

6. Objectifs de l'étude :

Cette étude est destinée à servir de base de réflexion et de guide au porteur de projet souhaitant soit convertir un ancien moulin en microcentrale hydroélectrique, soit réhabiliter une microcentrale, elle-même ancien moulin.

Etant donné que la rénovation de ces petites installations est encore une opération peu courante, son concepteur est bien souvent confronté à un véritable labyrinthe lié aux questions réglementaires, techniques, environnementales,....

De remarquables guides publiés par l'ADEME (F), par l'Association Européenne de la Petite Hydroélectricité (ESHA) et par l'Office Fédéral de l'Energie (CH) existent bien, mais ces ouvrages sont davantage orientés vers la création de nouvelles centrales et concernent principalement les puissances supérieures à celles des moulins.

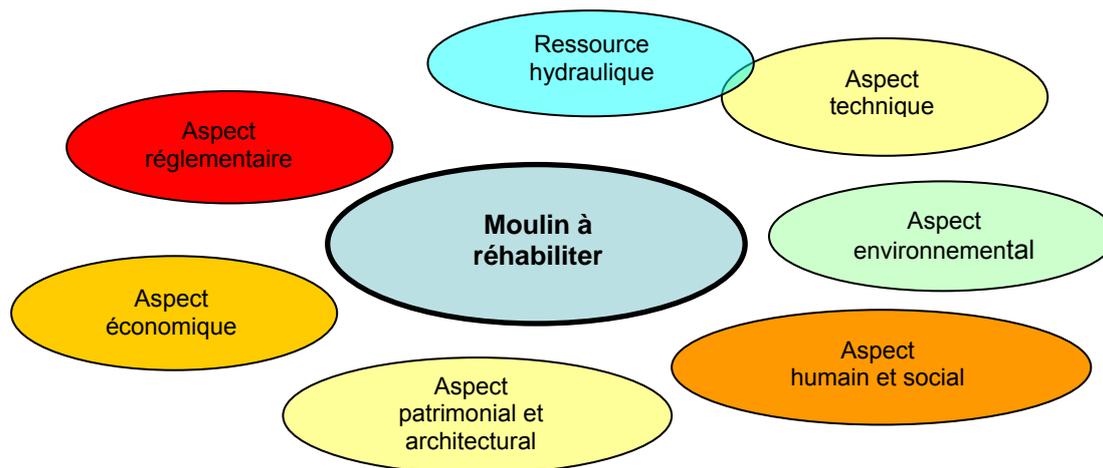
De ce fait, le porteur de projet doit, par exemple, faire face aux difficultés suivantes :

- La réglementation relative aux aménagements hydrauliques est précise et rigoureuse, mais le volet spécifique aux installations anciennes est souvent mal connu, et des fois mal interprété, y compris par ceux qui sont censés l'appliquer.
- Trop souvent, un petit aménagement hydraulique est perçu comme le modèle réduit d'une grande centrale, ce qui conduit à des choix d'équipements complexes, onéreux et nécessitant d'importants travaux d'implantation, d'un coût dissuasif. Par contre, les solutions technologiques parfaitement

adaptées aux installations de petite puissance, telles que les roues à aubes ou les vis hydrodynamiques, restent méconnues, en dépit de leurs performances et de leur prix raisonnable.

- Certaines démarches, en particulier celles qui aboutissent à la vente de l'énergie produite, paraissent complexes et rebutantes du fait du nombre des organismes à contacter.
- Plus que toute autre énergie renouvelable, l'hydroélectricité a une forte prise sur l'environnement. Par conséquent, en plus des aspects technico-économiques habituels, le concepteur devra se préoccuper de l'impact environnemental de son projet et des moyens d'améliorer celui-ci.

En fait, la rénovation d'un aménagement hydraulique, menée dans une démarche de développement durable, nécessite une approche globale et pluridisciplinaire. Ses différents aspects peuvent être traduits par le graphique ci-dessous :



Cette étude se propose d'analyser ces différents domaines en fonction des spécificités des petits aménagements hydrauliques, afin d'informer le porteur de projet des contraintes et des solutions existantes, de faciliter ses démarches et de l'orienter vers les publications ou les sites Internet incontournables.

Ainsi, ce document :

- Fera le point sur les différents aspects liés à la réhabilitation d'un petit aménagement hydraulique.
- Présentera une démarche permettant de mener à bien un tel travail, dans le cadre du développement durable.
- Illustrera cette démarche par des exemples concrets.
- Proposera des fiches complémentaires permettant d'approfondir des passages qu'il serait trop long de développer dans le corps même du mémoire.

Etant donné que les mêmes contraintes réglementaires, environnementales et technologiques s'appliquent à l'ensemble des anciens aménagements hydrauliques d'une puissance inférieure à 150 kW, nous débordons de la plage des puissances des moulins donnée par le rapport Dambrine.

Ainsi, cette étude concernera la transformation de moulins en microcentrales hydroélectriques et la réhabilitation d'anciennes microcentrales, d'une puissance inférieure à 150 kW.

L'aspect réglementaire et la partie relative au raccordement au réseau électrique sont spécifiques à la France. Les autres points s'étendent bien entendu à l'ensemble des pays européens.

Remarques :

L'astérisque * placé à la suite d'un terme renvoie au glossaire, page 106.

Les illustrations et les photographies dont la source n'est pas spécifiée sont d'origine personnelle.

II. Présentation des aménagements hydrauliques :

1. Quelques données générales :

Une installation hydraulique exploite l'énergie cinétique (liée à la vitesse) et l'énergie potentielle (liée au poids) d'une masse d'eau qui s'écoule entre deux points d'altitude différente.

La puissance mise à la disposition de l'installation est proportionnelle à cette dénivellation, appelée hauteur de chute, et au débit prélevé dans le cours d'eau : plus la hauteur de chute est faible, plus le débit utilisé devra être important pour obtenir une puissance donnée.

Le moteur hydraulique, qui permet de convertir l'énergie de l'eau en énergie mécanique, est le cœur de tout aménagement hydraulique. Dans un moulin, l'énergie mécanique ainsi obtenue est directement utilisée pour l'entraînement de machines (meules, scies, métiers à tisser,...) tandis que dans une centrale électrique, elle est convertie en énergie électrique par une génératrice.

En fonction de la hauteur de la chute, on distingue les aménagements :

- de haute chute, de hauteur supérieure à 100 m ;
- de moyenne chute, de hauteur comprise entre 15 et 100 m ;
- de basse chute, de hauteur inférieure à 15 m.

Les limites indiquées ci-dessus sont celles données par l'ADEME. Elles n'ont rien d'absolu et peuvent différer d'un organisme ou d'un pays à l'autre.

Les moulins anciens, qui font l'objet de notre étude, appartiennent à la catégorie des installations de **basse chute**. En effet, jusqu'au milieu du XIX^e siècle, les dénivelés exploitables étaient limités à une dizaine de mètres, du fait des caractéristiques des roues à aubes, les seuls moteurs hydrauliques alors connus.

Par ailleurs, sur la majorité de ces sites, la hauteur de la chute n'excède pas 5 mètres.

Un moulin ou une microcentrale de basse chute peuvent fonctionner selon les modes suivants :

- **Fonctionnement au fil de l'eau** : l'installation utilise une partie du débit instantané du cours d'eau. La production d'énergie suit par conséquent les variations saisonnières de ce débit. En période d'étiage*, si le débit disponible devient inférieur au minimum exploitable par le moteur hydraulique, l'activité de l'installation cesse.
- **Fonctionnement par éclusées** : l'installation est associée à une retenue d'eau, par exemple un étang, qui joue le rôle de réservoir. La centrale peut ainsi exploiter ponctuellement un débit nettement supérieur à celui du cours d'eau pour répondre à un besoin important de puissance, par exemple pour produire de l'électricité aux heures de forte consommation.

Ce mode de fonctionnement peut engendrer des variations brutales et de forte amplitude du débit et du niveau en aval de l'aménagement, voire entraîner un important transport de sédiments, en cas de vidange poussée. Comme ces variations répétitives sont préjudiciables à l'ensemble de la faune aquatique, ce mode de fonctionnement n'est pas recommandé pour une installation qui se veut exemplaire sur le plan environnemental¹.

De ce fait, nous ne traiterons que les installations fonctionnant au fil de l'eau.

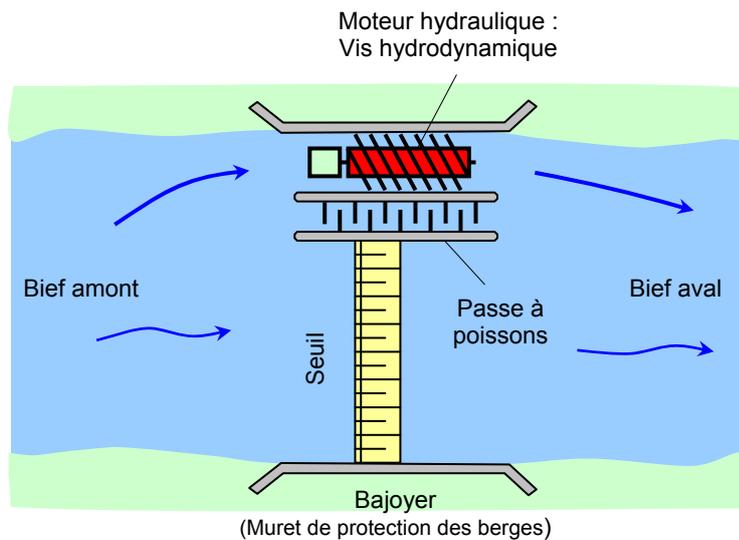
2. Typologie des ouvrages :

Un aménagement de basse chute fonctionnant au fil de l'eau est associé à un ouvrage de prise d'eau, habituellement un seuil, c'est-à-dire un barrage de faible hauteur, qui dérive l'eau vers le moteur hydraulique et maintient le niveau de la retenue à une valeur constante.

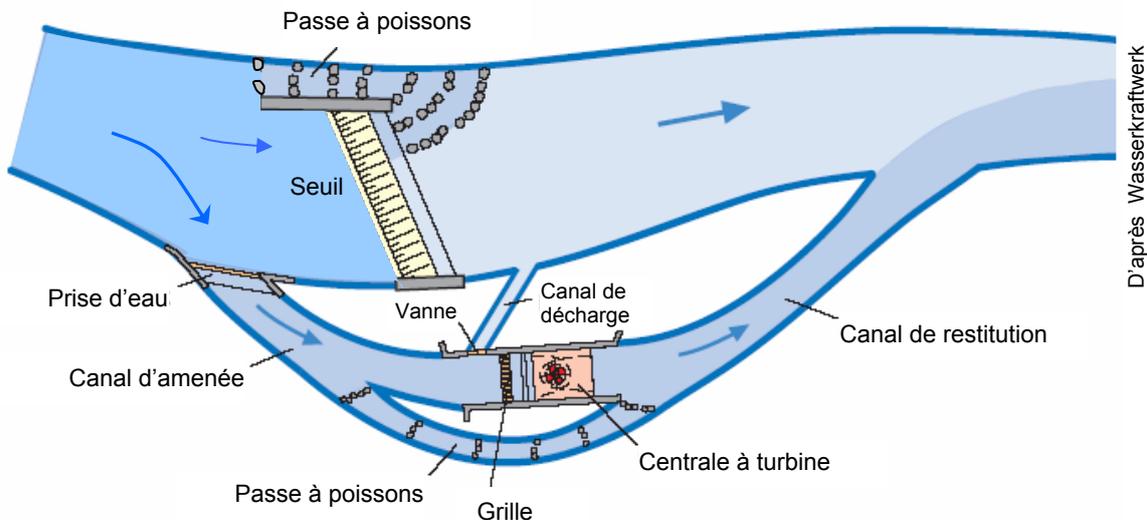
Deux types d'aménagements existent :

¹ OFEN (CH) - Petites centrales hydrauliques et écologie des eaux – Programme DIANE.

a. Le moteur hydraulique est intégré au seuil et exploite uniquement le dénivelé ainsi créé.



b. La centrale est implantée sur un canal de dérivation, aussi appelée canal usinier, dont la longueur peut aller de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres, et qui permet au moteur de profiter d'un dénivelé supérieur à la hauteur du barrage.



Ce type d'installation comporte un seuil à déversoir qui alimente une prise d'eau. Le seuil est habituellement muni d'un dispositif permettant le franchissement de l'ouvrage par les poissons.

Le canal d'amenée conduit l'eau, soit à ciel ouvert, soit par une galerie couverte, vers le moteur hydraulique. Celui-ci est protégé par une grille qui retient les corps flottants.

Un canal de fuite ou de restitution renvoie l'eau sortant du moteur hydraulique vers le cours d'eau.

Un canal de décharge permet de détourner l'eau du moteur hydraulique en cas de crue ou lors de travaux.

3. Constitution de la centrale

L'énergie de l'écoulement est convertie en énergie mécanique par un moteur hydraulique.

Celui-ci entraîne, souvent par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse, une génératrice électrique transformant l'énergie mécanique qui lui est transmise, en énergie électrique.

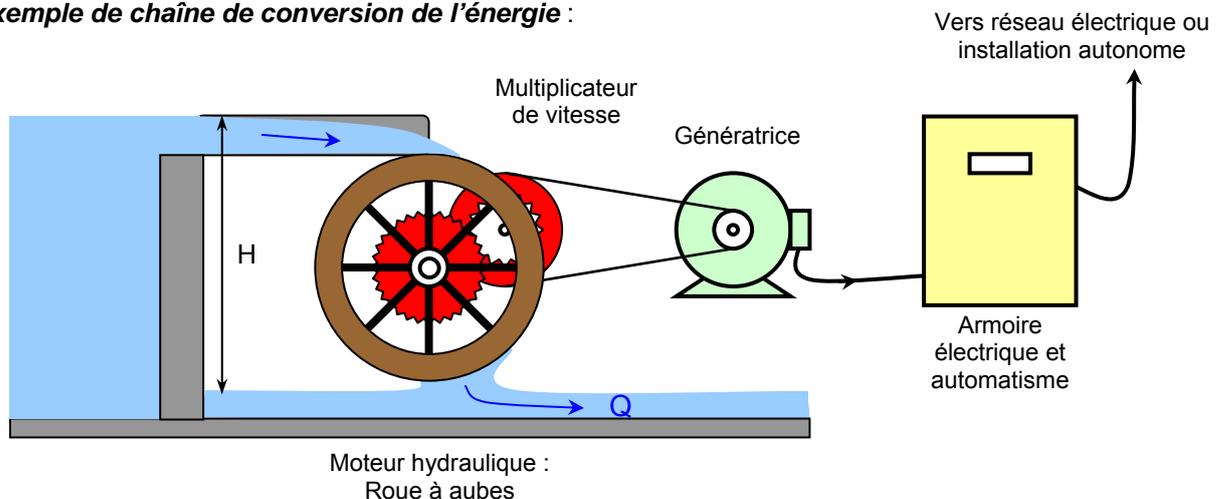
L'énergie électrique produite peut :

- alimenter une installation autonome, c'est-à-dire non raccordée au réseau électrique ;
- être injectée sur le réseau pour être consommée sur le site même ;
- être injectée sur le réseau pour être vendue à un fournisseur du marché de l'énergie.

Dans le domaine des puissances inférieures à 150 kW, qui nous intéresse ici, l'installation sera directement raccordée au réseau basse tension ou aux récepteurs sans nécessiter de transformateur.

Le fonctionnement d'une installation moderne est géré par un système automatisé.

Exemple de chaîne de conversion de l'énergie :



4. Puissance disponible :

Une chute de hauteur H (m), fournissant un débit Q (m^3/s), développe une puissance :

$$P (W) = \rho \cdot 9,81 \cdot H \cdot Q \quad \text{où } \rho \text{ désigne la masse volumique de l'eau (1000 kg/m}^3\text{).}$$

$$P (kW) = 9,81 \cdot H \cdot Q$$

Cette puissance est appelée puissance brute, elle caractérise le potentiel de la chute.

En pratique, une certaine partie de cette puissance est perdue lors du transit de l'eau par le canal d'amenée, la grille de protection,.... De même, chaque constituant de la chaîne de conversion présente des pertes d'énergie.

De ce fait, la puissance électrique disponible vaut : $P(kW) = \eta \cdot 9,81 \cdot H \cdot Q$

Le rendement global η de l'installation est habituellement compris entre 0,6 et 0,8. Sa valeur dépend de la puissance de la centrale : le rendement d'une installation de 5 kW sera proche de 0,55 , tandis que celui d'une installation de 100 kW peut atteindre 0,75.

Remarque : l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique (UNIPEDÉ) distingue, dans le domaine des puissances qui nous intéressent ici :

- les microcentrales, de puissance comprise entre 20 kW et 500 kW ;
- les pico-centrales, de puissance inférieure à 20 kW.

Cependant, au cours de cette étude, le terme « microcentrale » désignera toute installation de puissance inférieure à 150 kW.

III. La réglementation :

L'exploitation de l'énergie hydraulique est encadrée par une réglementation précise et rigoureuse, visant à assurer à la fois une utilisation rationnelle de la ressource hydraulique et à protéger l'environnement, en particulier le milieu aquatique.

Ainsi, la loi du 16 octobre 1919¹, relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique, stipule que « Nul ne peut exploiter l'énergie des cours d'eau, sans une concession ou une autorisation de l'Etat. »

La création ou la remise en service d'une microcentrale hydraulique sont ainsi subordonnées à l'obtention d'une autorisation administrative, de durée limitée, mais renouvelable.

Toutefois, les textes en vigueur reconnaissent également une autorisation sans limitation de durée aux installations suivantes :

- les aménagements « fondés en titre » ou « ayant une existence légale » ;
- les aménagements autorisés avant 1919, d'une puissance brute inférieure à 150 kW.

1. Les aménagements bénéficiant d'une autorisation sans limitation de durée :

Du fait de leur autorisation perpétuelle d'exploiter l'énergie hydraulique, les installations « fondées en titre » et celles autorisées avant 1919, de moins de 150 kW, correspondent aux cas favorables qui permettent d'envisager une réhabilitation sans nécessiter les démarches administratives longues, coûteuses et d'issue incertaine, qui seront décrites au § 2.

En acquérant un tel site, le propriétaire acquiert également le droit d'utiliser la force motrice de l'eau, que ce soit pour un usage purement mécanique (mouture, sciage,...) ou pour produire de l'énergie électrique.

a. Les aménagements « fondés en titre » ou « ayant une existence légale » :

A la Révolution, le gouvernement a accordé le droit perpétuel d'utiliser l'énergie de l'eau aux moulins établis avant 1789 sur les cours d'eau non domaniaux, c'est-à-dire faisant partie du domaine privé. Sur les cours d'eau domaniaux, appartenant à l'Etat, les moulins existant avant la promulgation de l'Edit des Moulins, en 1566, bénéficient des mêmes prérogatives. Enfin, dans les provinces rattachées ultérieurement à la France, comme la Savoie, le Comté de Nice,... ces dispositions s'appliquent aux moulins existant à la date du rattachement.

Ces aménagements disposent d'un droit d'eau « fondé en titre », qui fait l'objet d'une abondante jurisprudence².

- Le droit d'eau fondé en titre est attaché au site. Il se transmet par la vente, l'héritage, la donation du bien, et peut être loué à un exploitant.
- Ce droit est imprescriptible : il ne se perd pas si la chute n'est pas utilisée ou si l'ouvrage n'est pas entretenu pendant une durée prolongée, ni même en cas de dégradation de l'installation.
En revanche, ce droit s'éteint :
 - en cas de renoncement écrit du propriétaire ;
 - par la ruine totale de l'ouvrage, qui empêche son identification, ou par le changement de son affectation, si elle ne permet plus l'utilisation de la force motrice de l'eau ;
 - dans certains cas extrêmes, par exemple si l'ouvrage menace la sécurité publique, par révocation préfectorale, en application de l'article L 215-10 du Code de l'environnement.
- Ce droit n'est valable que pour la « consistance légale », c'est-à-dire pour la puissance brute de la chute en 1789. L'installation actuelle doit respecter les valeurs de l'époque en ce qui concerne :
 - la cote de la prise d'eau ;

¹ Consultable, avec l'ensemble des textes relatifs à l'hydroélectricité, sur le site du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable : www.ecologie.gouv.fr, dans la rubrique : Entreprises hydroélectriques, recueil de textes.

² De nombreux textes sont consultables sur le site Internet du Syndicat de Défense des Moulins et Cours d'Eau (SDMCE) : www.moulineau.org Ex : Arrêts du Conseil d'Etat « SA Laprade Energie », du 5 juillet 2004 et « M.A. » du 16 janvier 2006.

- la cote du point de restitution de l'eau à la rivière ;
- le débit maximal prélevé.

Certains ouvrages furent modifiés au fil du temps afin d'augmenter leur puissance, par exemple par une surélévation du seuil ou par un abaissement du point de restitution.

Contrairement à ce qui est souvent affirmé, cet accroissement de la consistance n'entraîne pas l'extinction du droit d'eau : le fait de ramener l'ouvrage à ses caractéristiques d'origine lui fait recouvrer intégralement son droit.

Son propriétaire peut également obtenir la régularisation de la situation actuelle, en demandant une autorisation administrative pour le surcroît de puissance. Mais cette démarche, qui sera décrite au § 2, peut être longue et onéreuse.

En l'absence de documents permettant de définir la consistance, « la jurisprudence affirme que la consistance d'un droit fondé en titre est présumée, sauf preuve du contraire, conforme à sa consistance actuelle, et que la charge de la preuve du contraire revient à l'administration »¹.

Concrètement, l'existence d'un moulin avant l'abolition des droits féodaux est attestée par :

- un titre ou un acte antérieur à 1789, tel qu'un acte de vente, un bail à ferme, un acte notarié.
- le procès verbal de l'adjudication du moulin comme bien national.

Ces documents peuvent être recherchés aux Archives Départementales (Sections M, P, S).

Il est par ailleurs recommandé de collecter un maximum de renseignements au sujet de la puissance de l'époque.

- la mention du moulin sur la carte de Cassini. Cette carte de France fut dressée par le géographe Cassini entre 1750 et 1780, à la demande du Roi Louis XV. Les moulins existant à cette époque y sont symbolisés par une roue.

La carte de Cassini est consultable sur le site Internet www.locom.org et ses feuillets sont en vente à l'Institut Géographique National (IGN).



Extrait de la carte de Cassini

b. Les installations autorisées ou réglementées avant 1919 :

Dès le début du XIX^e siècle, l'exploitation de l'énergie hydraulique par de nouveaux aménagements ou l'augmentation de la puissance des installations existantes, furent subordonnées à l'obtention d'une autorisation préfectorale définissant les caractéristiques de la chute et fixant les droits et les obligations de l'exploitant. Ces éléments constituent le « règlement d'eau ».

Par ailleurs, de nombreux moulins « fondés en titre » furent réglementés, c'est-à-dire reçurent un règlement d'eau, à l'occasion d'une augmentation de la puissance ou en raison de litiges.

A l'origine, tous les documents relatifs à ce règlement d'eau étaient rassemblés dans une « chemise de dossier » détenue par l'administration. Actuellement, ces documents sont en principe conservés par la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF), l'organisme qui assure la partie administrative de la police de l'eau, à moins qu'ils n'aient été entreposés aux Archives Départementales (Section S).

Le droit d'eau de ces aménagements de puissance brute inférieure à 150 kW, présente de nombreuses similitudes avec celui des installations « fondées en titre » :

- il se transmet dans les mêmes conditions et n'est pas limité dans le temps ;
- il peut être abandonné par son propriétaire ou révoqué par l'administration ;
- la puissance brute, qui est définie par le règlement d'eau, doit être respectée, et tout accroissement de la puissance est subordonné à l'obtention d'une autorisation administrative.

¹ Lettre du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable à un adhérent du SDMCE -2006- (voir note 2, page 11).

De même, le règlement d'eau fixe les dimensions et les cotes du déversoir. Celui-ci constitue un organe de sécurité et de régulation faisant partie d'un ensemble hydraulique complet. Bien qu'il puisse sembler séduisant, lors d'une réhabilitation, d'intégrer directement le moteur hydraulique dans un seuil déversant, une telle opération n'est pas autorisée car elle modifierait la capacité d'évacuation de l'ouvrage.

Enfin, il faut noter que le règlement d'eau d'un aménagement et les plans qui l'accompagnent ne précisent pas obligatoirement la valeur du débit maximal exploitable, mais ils donnent les renseignements, tels que les dimensions des vannages, la cote du déversoir..., qui permettent de le déterminer (voir Fiche 1).

c. Comment s'assurer de la situation administrative d'un moulin :

Avant d'envisager la remise en service d'un aménagement hydraulique fondé en titre ou autorisé avant 1919, il est nécessaire de rassembler, auprès de la DDAF et des Archives Départementales ou Municipales, toutes les informations relatives à l'histoire du moulin, ainsi que les données et les croquis permettant de définir la consistance du droit d'eau.

Ainsi, afin d'éviter les litiges avec l'administration lors de la réhabilitation d'un aménagement, la Fédération Française de Amis des Moulins recommande à tout propriétaire d'un moulin « d'avoir en sa possession les originaux ou les copies des actes administratifs concernant la chute, aussi loin que la connaissance peut remonter »¹.

Ces documents constitueront la « **Carte grise** » du moulin, qui comprendra :

Pour une chute « fondée en titre »:

- La preuve administrative avérée de son existence avant 1789.

Pour une chute « fondée en titre » et réglementée ou autorisée :

- La preuve administrative avérée de son existence avant 1789.
- La chemise de dossier complète ; à défaut, tout acte administratif concernant la chute et explicite du règlement d'eau.

Pour une chute réglementée ou autorisée :

- La chemise de dossier complète ; à défaut, tout acte administratif concernant la chute et explicite du règlement d'eau.

« Tous ces documents devront être conservés et transmis en cas de vente ou d'héritage. De plus, ils devront impérativement être annexés et mentionnés dans les actes notariés. Ils éviteront ainsi les très nombreux litiges de tous ordres occasionnés par des actes vagues ou incomplets. Les mots "moulin" ou "ancien moulin" ne veulent juridiquement rien dire sans ces documents, et les extraits de cadastre ne font pas foi en cas de litige »¹.

Par ailleurs, il sera également indispensable de s'assurer auprès de la DDAF que le droit d'eau n'a été ni révoqué par l'administration, ni abandonné par un ancien propriétaire.

De même, il faudra vérifier qu'il n'a pas été cédé à une collectivité locale ou territoriale (Commune, Syndicat des eaux,...).

A partir de ces différentes informations, nous pourrions déterminer, à l'aide du logigramme de la page suivante, si la réhabilitation d'un moulin est légalement envisageable.

Remarque importante :

De nombreuses propriétés furent divisées au fil des ventes et des héritages, de sorte que les différents constituants d'un bief peuvent maintenant faire partie de propriétés différentes.

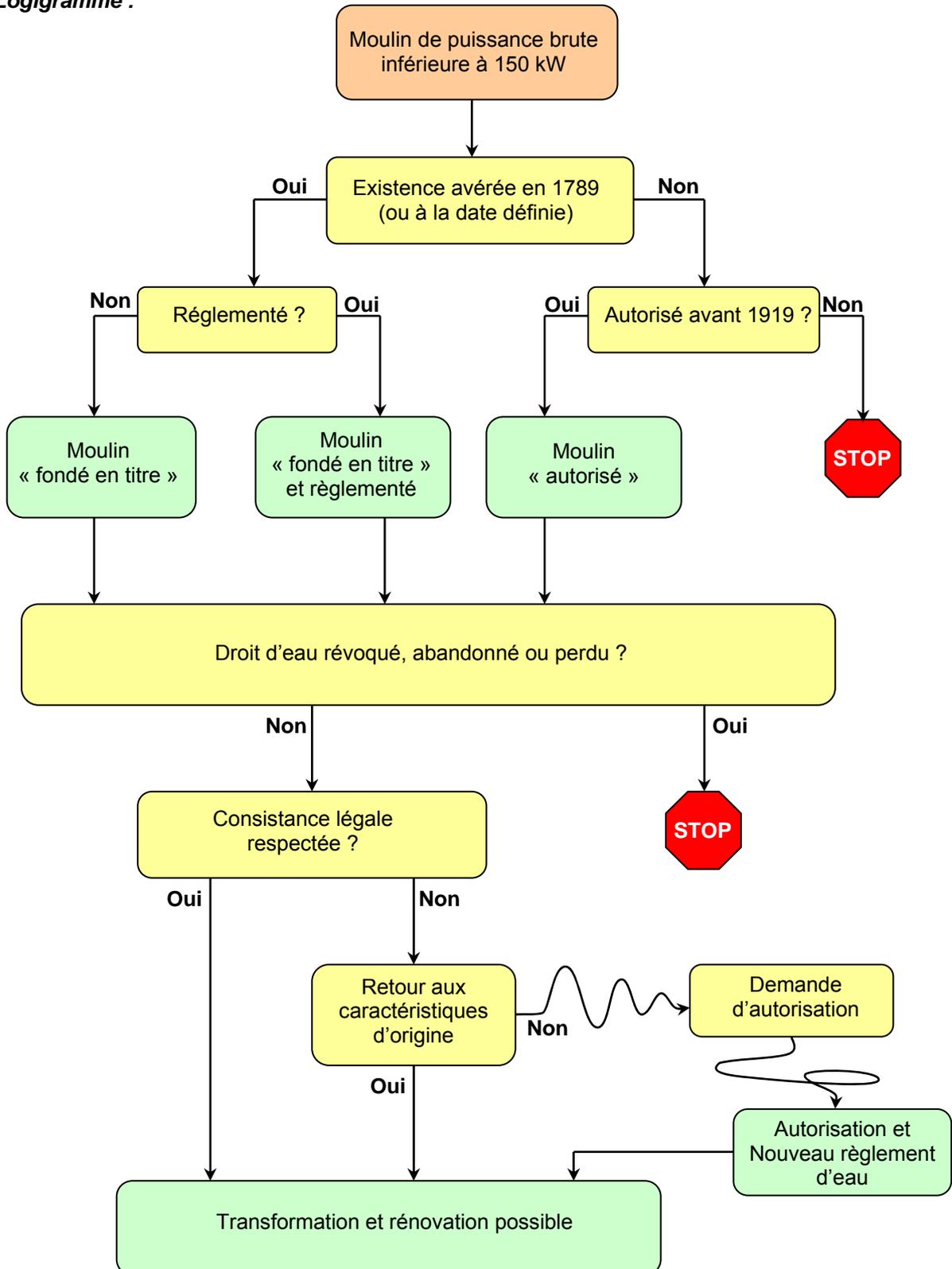
« L'article 546 du Code Civil édicte que « la propriété d'une chose...donne droit sur tout ce qu'elle produit et sur tout ce qui s'y unit accessoirement, soit naturellement, soit artificiellement »².

¹ « Carte grise des moulins » – document FFAM du 27.05.07.

² « Notice Vallée de Chevreuse » - document FFAM du 17.03.07.

« Ce droit s'appelle "droit d'accession", et permet à un propriétaire de moulin d'accéder à tout ce qui permet le fonctionnement de son moteur. Par conséquent, lorsqu'un bief traverse des propriétés ne lui appartenant plus, il garde la propriété du bief et d'une bande de terrain de chaque côté, lui permettant d'effectuer l'entretien. De même façon, si un vannage de prise d'eau, à la suite de morcellement d'héritages, ne se trouve plus sur ses terres, l'usinier en garde la maîtrise et a seul le droit d'actionner ces vannages, avec la responsabilité civile que cela entraîne. »

Logigramme :



d. Recommandations importantes concernant les travaux :

Dès que la situation administrative de l'ouvrage est clairement établie et que les grandes lignes du projet de réhabilitation sont définies, il est vivement conseillé, avant de passer à la phase pratique, de soumettre ce projet à la DDAF. Cette démarche évitera d'engager de coûteux travaux qui risqueraient d'enfreindre la réglementation en vigueur et, par conséquent, d'entraîner de lourdes sanctions tout en n'aboutissant qu'à un résultat impossible à exploiter ; en effet, pour que la future centrale puisse bénéficier de l'obligation d'achat par EDF de l'électricité produite, la DDAF devra pouvoir attester que l'ouvrage respecte effectivement l'ensemble de la réglementation concernant les milieux aquatiques.

De même, avant toute intervention dans le lit d'un cours d'eau, en vue de la réfection d'un seuil, des vannes,.... nous informerons systématiquement la DDAF de la teneur des travaux projetés. En retour, cet organisme définira les modalités de la procédure à suivre, en fonction de la nature de l'intervention. Notons enfin que les canaux de dérivation ou de décharge d'un aménagement ne font pas partie du cours d'eau, mais de la propriété du moulin.

2. L'autorisation administrative :

La création et la remise en service d'une microcentrale qui ne bénéficie pas des dispositions exposées précédemment, ou l'augmentation de la puissance d'un aménagement autorisé ou fondé en titre, sont subordonnées à l'obtention d'une autorisation administrative.

Le porteur du projet dépose à la préfecture un dossier de demande d'autorisation qui sera instruit par la Mission Inter-Service de l'Eau (MISE). Ce dossier doit obligatoirement être accompagné d'une « notice d'impact » réalisée par un bureau d'études spécialisé (5 à 20 000 €), qui récapitule les impacts engendrés par la centrale sur son environnement.

Après instruction du dossier, enquête publique, consultation du Conseil Général et du Comité Départemental d'Hygiène, le préfet accorde ou non une autorisation assortie d'un règlement d'eau. Cette autorisation est valable pour une durée renouvelable de 30 ans. Cependant, la procédure permettant de l'obtenir peut être longue : de 2 à 6 ans.

Dans le cas d'un aménagement fondé en titre ou autorisé, cette démarche n'est pleinement justifiée que si la puissance brute de la future centrale est nettement supérieure à celle définie par l'ancien droit d'eau. La marche à suivre est détaillée dans le « Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité » de l'ADEME.

3. Note concernant le classement de cours d'eau :

La législation distingue les catégories suivantes de cours d'eau :

- Les cours d'eau « réservés » au titre de la loi du 16 octobre 1919 : sur ces cours d'eau, aucune autorisation ou concession n'est accordée pour des entreprises hydrauliques nouvelles. La liste des cours d'eau réservés est fixée par décrets en Conseil d'Etat.
- Les cours d'eau classés au titre du franchissement des poissons migrateurs, en vertu de l'article L 242.6 du code de l'environnement.

Tout nouvel ouvrage sur ces cours d'eau doit comporter un dispositif assurant la circulation des poissons migrateurs, et son exploitant est tenu d'assurer le fonctionnement et l'entretien de ce dispositif.

Les ouvrages existants doivent être mis en conformité avec ces dispositions, sans indemnité, dans un délai de 5 ans à compter de la publication d'une liste d'espèces migratrices par bassin ou sous-bassin, fixée par le Ministre chargé de la pêche en eau douce et, le cas échéant, par le Ministre chargé de la mer.

Les listes des cours d'eau réservés et classés sont consultables sur le site du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable : www.ecologie.gouv.fr , dans la rubrique : Entreprises hydro-électriques, recueil de textes.

IV. La ressource hydraulique :

L'énergie hydraulique exploitable sur un site dépend de deux données fondamentales :

- le débit disponible du cours d'eau ;
- la hauteur de la chute.

Dans le cadre de la réhabilitation d'un aménagement, la connaissance de ces données nous permettra :

- de vérifier le dimensionnement du moteur hydraulique existant, et si le remplacement de ce dernier se révélait nécessaire en raison de son mauvais état ou de ses piètres performances, nous pourrions choisir une machine parfaitement adaptée aux caractéristiques du site, dans les limites imposées par droit d'eau ;
- d'estimer la production annuelle de l'aménagement, et d'évaluer son temps de retour sur investissement.

1. Le débit :

Le débit d'un cours d'eau n'est pas constant dans le temps : il est au contraire soumis à des variations saisonnières systématiques et à des variations interannuelles qui dépendent à la fois des précipitations et des caractéristiques du bassin versant, c'est-à-dire de la zone géographique recevant les précipitations qui alimentent le cours d'eau.

En fait, le lien entre les précipitations et le débit d'une rivière dépend des particularités de son bassin versant, telles que la superficie, l'orientation géographique, la nature du sol, le couvert végétal,....

Pour connaître l'évolution du débit d'une rivière durant une année moyenne, véritable signature de ce cours d'eau, nous devons disposer des valeurs journalières de ce débit, collectées sur une longue durée, si possible 5 ou 10 ans !

a. Les sources d'information :

- Des stations de jaugeage gérées par des organismes tels que la DIREN, le CEMAGREF, EDF,... équipent de nombreux cours d'eau et relèvent en continu leur niveau et leur débit.

Les mesures provenant de ces stations sont centralisées dans la banque de données Hydro, consultable par Internet sur le site : www.hydro.eaufrance.fr.

Les fichiers détaillés de ces relevés, intéressants pour une analyse approfondie au moyen d'un outil informatique, peuvent habituellement être obtenus auprès des organismes gérant les stations de mesure, ou du Syndicat en charge de la gestion du cours d'eau.

Si l'aménagement à réhabiliter est situé au voisinage d'une station de jaugeage et si aucun affluent majeur ne se jette dans le cours d'eau entre ces deux sites, nous pourrions directement utiliser les données fournies par la station.

En revanche, si la centrale est relativement éloignée de la station de jaugeage ou si le cours d'eau compte des affluents importants entre ces deux sites, les données fournies par la station devront être corrigées en fonction des surfaces respectives des bassins versants (Voir Fiche 3).

- Si le cours d'eau n'est équipé d'aucune station de jaugeage, ou si cette dernière est très éloignée du site à réhabiliter, il peut être tentant d'effectuer des mesures directes du débit ; cependant, l'obtention de valeurs précises nécessite un appareillage et un savoir faire qui sortent du cadre de cette étude¹. Néanmoins, les méthodes du flotteur ou du déversoir sont simples à mettre en œuvre (Voir Fiche 2), mais nous devons tenir compte des limites de leur précision.



Station de jaugeage sur le Gave de Pau (65)

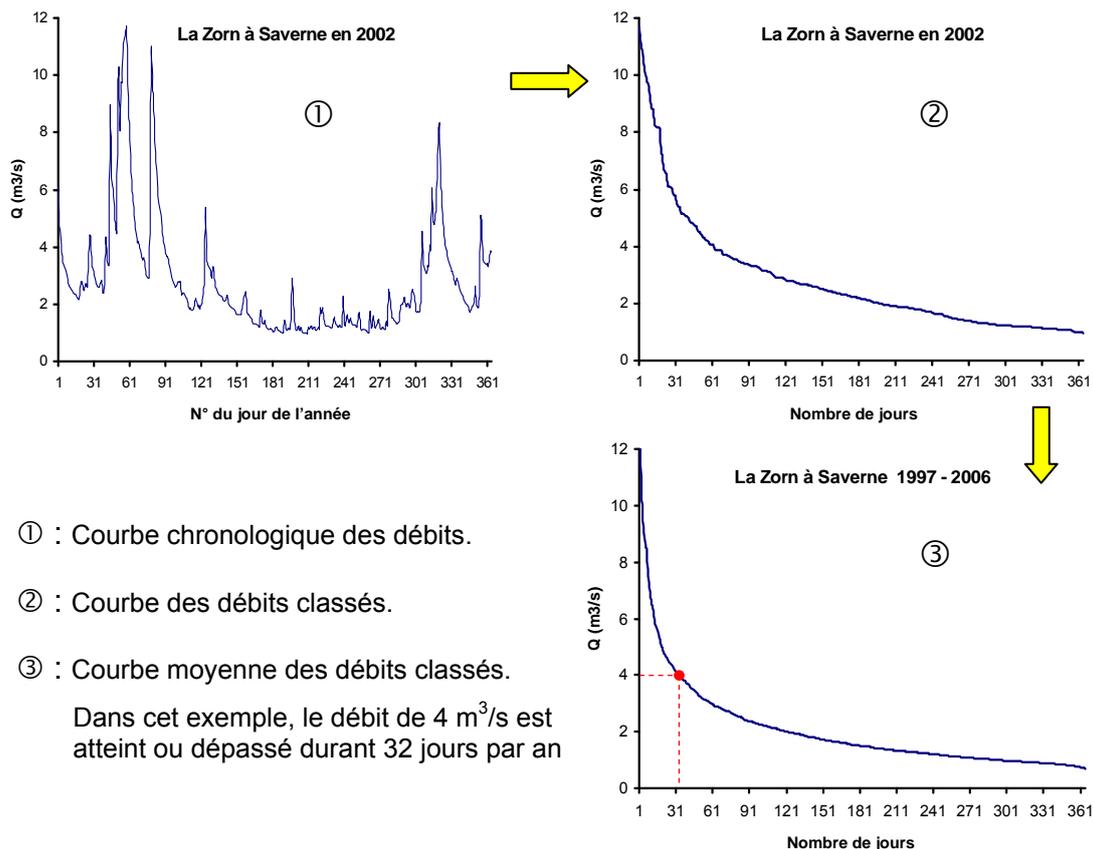
¹ Voir ESHA - Petite hydroélectricité - Guide technique pour la réalisation de projets. Chapitre 3 : Hydrologie.

Comme il est habituellement impossible de procéder à des mesures sur une durée satisfaisante, leurs résultats serviront essentiellement à établir une corrélation entre le débit au niveau du site à réhabiliter et celui relevé par la station de jaugeage d'un cours d'eau voisin dont le bassin versant présente des caractéristiques semblables (Voir Fiche 2).
Par ce biais, nous pourrions obtenir des valeurs pertinentes du débit au niveau de notre site.

- Par ailleurs, des mesures pourront également être menées pour confirmer les différents calculs évoqués précédemment.
- Enfin, les anciens propriétaires du moulin et les exploitants d'autres centrales établies sur le même cours d'eau pourront également fournir de précieux renseignements complémentaires.

b. Le traitement des informations :

- Les valeurs moyennes journalières fournies par une station de jaugeage permettent, après une éventuelle correction tenant compte de l'éloignement du site, de tracer la **courbe chronologique** des débits, très irrégulière et délicate à employer pour dimensionner une centrale hydraulique.
- Pour simplifier l'exploitation de ces informations, les débits journaliers sont arrangés par valeurs décroissantes. La **courbe des débits classés** ainsi obtenue indique le nombre de jours par an (ou le pourcentage de l'année) où le débit est supérieur ou égal à une valeur donnée.



- Pour obtenir les valeurs réellement représentatives du régime moyen du cours d'eau, qui nous permettront de dimensionner le moteur hydraulique et d'évaluer la production de la centrale, nous devons établir la courbe des débits classés portant sur plusieurs années.

Pour cela, il nous faudra soit déterminer **la moyenne** des courbes annuelles **des débits classés**, soit classer les débits relevés sur l'ensemble de cette période, puis ramener la durée sur une année.

En revanche, le classement de la moyenne des courbes chronologiques ne fournit pas d'informations utilisables pour dimensionner une installation hydroélectrique.

Nota : la fiche de synthèse hydrologique d'un cours d'eau, disponible sur le site de la banque de données Hydro, donne directement les points de la courbe moyenne des débits classés.

- Toutefois, les courbes des années extrêmes sont également intéressantes car elles permettent d'évaluer l'influence sur la production d'une année très sèche ou très humide.

De même, si la centrale bénéficie de tarifs saisonniers pour la vente de l'énergie, par exemple d'un tarif d'été et d'un tarif d'hiver, il est intéressant d'établir une courbe des débits classés pour chacune de ces saisons tarifaires afin d'estimer les revenus générés par la vente de l'énergie.

c. Débit d'équipement d'une installation :

A partir de la courbe moyenne des débits classés, nous déterminerons le **débit d'équipement**, c'est-à-dire le débit maximal pouvant être exploité par la microcentrale. Si celle-ci ne comporte qu'un seul moteur hydraulique, le débit d'équipement est aussi égal au débit nominal de cette machine.

Le débit d'équipement sera défini en fonction des contraintes suivantes :

- L'intégralité du débit instantané du cours d'eau n'est jamais exploitable par le moteur hydraulique. Nous devons en déduire :

- les **fuites éventuelles** au niveau du barrage et du canal d'amenée ;

- le débit éventuellement prélevé par un **captage** alimentant un réseau d'eau potable ou d'irrigation ;

- le **débit réservé**. Dans le cas d'une centrale établie sur un canal de dérivation, un débit minimal, appelé débit réservé (ou de restitution), doit être maintenu dans le tronçon court-circuité de la rivière afin d'y préserver la qualité de l'eau et des conditions de vie acceptables par la faune et la flore aquatiques. Sa valeur, fixée par l'administration, est exprimée en une fraction du module. Ce dernier, encore appelé débit moyen interannuel, correspond à la moyenne du débit du cours d'eau au niveau du site, calculée sur une durée au moins égale à 5 ans.

Si par le passé, les anciens aménagements n'étaient tenus de respecter qu'un débit réservé égal au $1/40^{\text{e}}$ du module, la réglementation actuelle impose à l'ensemble des installations hydrauliques, une valeur **au moins** égale au $1/10^{\text{e}}$ du module, à l'horizon 2014.

Par ailleurs, en fonction du peuplement piscicole du cours d'eau (salmonidés,...), l'administration peut fixer un débit réservé supérieur au seuil du $1/10^{\text{e}}$ du module, afin d'assurer des conditions de vie optimales aux espèces les plus sensibles.

En l'absence de ces prescriptions particulières, nous pourrions cependant nous baser sur un débit réservé égal au $1/10^{\text{e}}$ du module.

Enfin, lorsque le moteur hydraulique est directement intégré au barrage et que la centrale ne comporte ni canal d'amenée, ni canal de restitution, cette notion de débit réservé ne s'applique pas, étant donné qu'aucun écoulement n'est détourné du cours d'eau.

- Sur un aménagement existant, le débit maximal autorisé est imposé par le **droit d'eau**. Cette valeur ne doit pas être dépassée, sous peine de nous faire perdre le bénéfice des dispositions légales favorables liées à ce droit.
- Il est en revanche tout à fait possible d'adopter un débit d'équipement inférieur à la valeur réglementaire, si cela permet d'optimiser le dimensionnement du moteur hydraulique ou d'adapter l'installation à un mode de fonctionnement particulier, tel que l'alimentation d'une installation électrique autonome.

On constate en fait que certaines anciennes turbines sont surdimensionnées par rapport au potentiel réel du site, ce qui réduit leur efficacité. En effet, le rendement d'un moteur hydraulique décroît avec le débit et, en dessous d'un certain débit minimal, la machine ne fonctionne plus de manière satisfaisante. Ainsi, un moteur hydraulique dimensionné pour un débit trop important

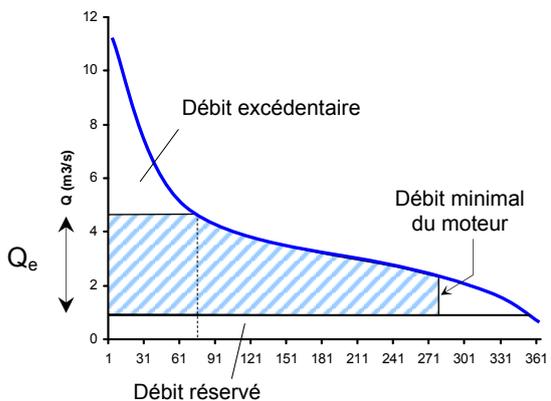
coûtera plus cher que nécessaire, travaillera la plupart du temps en charge partielle avec un mauvais rendement, et cessera de fonctionner en période de basses eaux.

A l'inverse, un débit d'équipement trop faible ne permettra pas de profiter pleinement du potentiel du site.

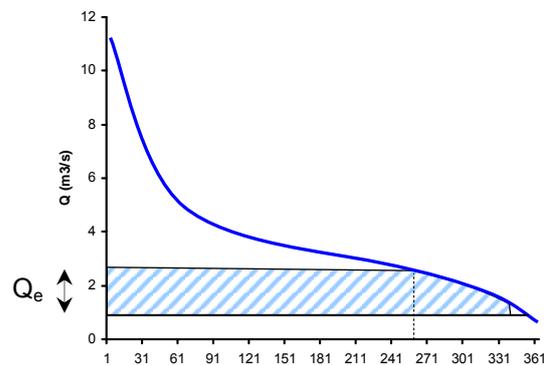
Aussi est-il judicieux de s'interroger sur le bon dimensionnement du moteur hydraulique, en particulier si celui-ci doit être remplacé.

A chaque fois que le droit d'eau le permet, le débit d'équipement Q_e de la centrale sera choisi comme suit :

- Si la centrale est destinée à fonctionner en parallèle avec le réseau électrique, en vue de la vente de l'énergie produite, notre objectif sera de maximiser la production annuelle. Le débit d'équipement, qui dépend de l'allure de la courbe des débits classés, sera habituellement celui atteint ou dépassé pendant une durée comprise entre 50 et 90 jours par an ; une valeur plus précise pourra être déterminée par itérations, à l'aide d'un tableur traitant les débits classés (Voir page 21).
- Si la centrale doit alimenter un réseau autonome, notre objectif sera de produire de l'électricité sur la plus longue durée de possible : le débit d'équipement choisi sera celui atteint ou dépassé pendant 250 à 300 jours par an, sous réserve que la puissance électrique générée à ce régime soit suffisante pour alimenter les récepteurs de l'installation.
- Bien entendu, si ces valeurs sont supérieures à celles permises par le droit d'eau, c'est la limite imposée par de dernier qui devra être retenue.



Fonctionnement en parallèle avec le réseau



Fonctionnement autonome

2. La hauteur de la chute :

- La hauteur de chute brute** est égale à la différence d'altitude entre les niveaux des plans d'eau à l'amont et à l'aval de la centrale. Elle peut être mesurée à l'aide d'un niveau de chantier et d'une mire, voire, dans le cadre d'une pré-étude, lorsqu'une grande précision n'est pas exigée, par un niveau laser.

Le niveau de référence amont est la crête du déversoir, qui correspond au niveau légal du règlement d'eau. Le niveau aval est celui du plan d'eau à la sortie du moteur hydraulique.

Rappel : sur un aménagement « ayant une existence légale » ou « autorisé avant 1919 », les cotes de la crête du réservoir et du point de restitution au cours d'eau, définies par le droit d'eau, doivent impérativement être respectées, sous peine de nous faire perdre le bénéfice des dispositions légales favorables attachées à ce droit.

b. La hauteur de chute nette est égale à la hauteur de chute brute diminuée :

- des pertes de charge¹, qui correspondent aux pertes d'énergie dues aux frottements de l'eau sur les parois des canaux et sur les singularités telles que la grille de protection, les rétrécissements, les coudes. Les pertes de charge sont proportionnelles au carré du débit.
- des limitations inhérentes aux moteurs hydrauliques, tels que les roues en dessus ou les turbines à flux traversant, qui ne permettent pas d'exploiter l'intégralité de la hauteur de la chute.

La puissance hydraulique réellement exploitable est proportionnelle à la hauteur de chute nette.

c. Remarque importante : sur une installation de basse chute, la hauteur de la chute peut varier en fonction du débit du cours d'eau :

- Si le niveau amont est établi par un seuil fixe ou comportant des vannes de décharge qui ne sont actionnées qu'en cas de forte crue, le niveau du plan d'eau amont augmente avec le débit.
- De même, le niveau en aval de la centrale peut également monter en cas de fortes eaux ; ce phénomène diminue la hauteur de chute exploitable et réduit la puissance récupérable par l'installation.

3 Puissances et production d'énergie :

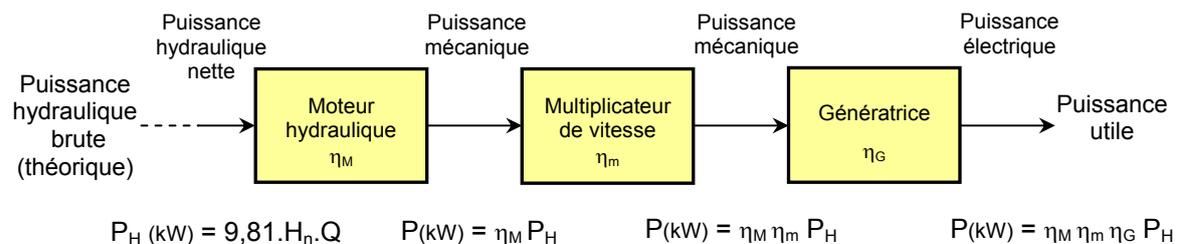
a. Puissances :

La puissance brute, qui est fonction de la chute brute H , caractérise la puissance potentielle d'un aménagement : $P \text{ (kW)} = 9,81.H . Q$

La puissance hydraulique réellement disponible est proportionnelle à la hauteur de chute nette H_n :

$$P_H \text{ (kW)} = 9,81.H_n.Q$$

La chaîne de conversion d'un microcentrale peut être modélisé comme suit. Chacun de ses constituants présente un certain rendement η , inférieur à 1.



La puissance électrique produite vaut : $P(kW) = 9,81 \eta_M \eta_m \eta_G H_n Q$

La puissance électrique installée P_n caractérisant la centrale, est celle calculée pour le débit d'équipement Q_e :

$$P_n(kW) = 9,81 \eta_M \eta_m \eta_G H_n Q_e$$

Remarque : La hauteur de chute nette H_n dépend du débit Q .
 Le rendement η_M du moteur hydraulique dépend du débit Q (voir chapitre VI).
 Le rendement η_G de la génératrice dépend de la puissance mécanique qui lui est transmise (voir chapitre VIII).

¹ Pour la méthode de calcul détaillé des pertes de charge, voir : ESHA - Petite hydroélectricité - Guide technique pour la réalisation de projets.

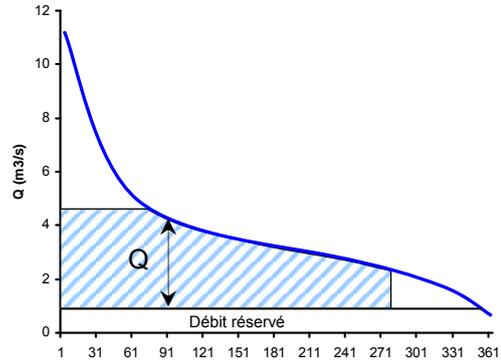
b. Energie produite :

Pour un « jour j » quelconque de la courbe des débits classés, nous notons la valeur du débit Q exploité par la centrale.

Par exemple, pour le « jour 91 », compte tenu du débit réservé ($1 \text{ m}^3/\text{s}$), le débit exploitable vaut : $4,5 - 1 = 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

A partir de cette valeur du débit exploitable Q :

- connaissant les pertes de charge ΔH , nous déterminons la chute nette $H_n = H - \Delta H$;
- connaissant les courbes de rendement du moteur hydraulique et de la génératrice, nous retrouvons η_M , puis η_G .



A partir de ces données, nous calculons la puissance électrique P_j développée lors de ce « jour j » :

$$P_j(\text{kW}) = 9,81 \eta_M \eta_m \eta_G H_n Q$$

L'énergie $W_j(\text{kWh})$ fournie durant ce « jour j » est égale au produit de la puissance multipliée par le temps durant lequel cette puissance est produite, c'est-à-dire 24 heures :

$$W_j(\text{kWh}) = 24 P_j$$

Pour déterminer l'énergie totale produite par l'installation au cours de l'année, nous répétons l'opération précédente pour chacun des 365 jours de l'année, puis nous calculons la somme des énergies quotidiennes :

$$W(\text{kWh}) = \sum W_j = \sum (24 P_j) = \sum (24 \cdot 9,81 \eta_M \eta_m \eta_G H_n Q)$$

Bien entendu, pour plus de commodité, ces calculs seront effectués par un tableur informatique.

Dans le cadre de cette étude, un classeur Excel nommé « Calcul Hydro », mettant en œuvre la méthode décrite ci-dessus, a été développé afin d'évaluer la production annuelle des sites.

Il sera utilisé pour l'étude des cas figurant dans les Dossiers 1 et 2.

V. Les ouvrages hydrauliques:

1. Le barrage :

Le barrage de faible hauteur, encore appelé seuil, constitue l'ouvrage capital d'un moulin ou d'une microcentrale hydrauliques.

Il dérive l'eau vers le moteur hydraulique de l'aménagement, limite les variations du niveau du plan d'eau en amont de l'ouvrage et laisse s'écouler l'eau qui n'est pas utilisée par la centrale (le débit réservé et excédentaire).

Sa restauration représente l'un des points-clés de la réhabilitation d'un aménagement.

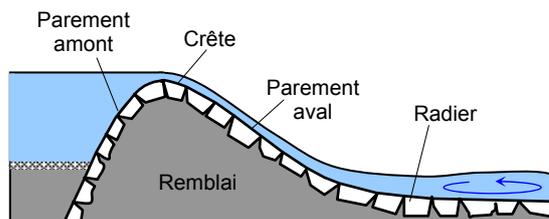
La constitution d'un ouvrage traditionnel est toujours liée à sa localisation géographique, aux pratiques locales, aux matériaux disponibles ainsi qu'aux particularités mêmes du site où l'aménagement est établi.

Il est cependant possible de distinguer trois familles de barrages associés aux moulins :

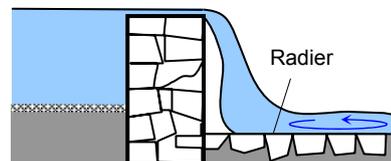
a. Les seuils déversants fixes :

Ces ouvrages ne comportent aucun organe mobile permettant de contrôler l'écoulement.

Le tracé en plan de ces seuils peut être rectiligne, courbe ou en ligne brisée. Leur axe d'implantation est soit perpendiculaire, soit oblique à l'axe du cours d'eau. Dans ce dernier cas, l'ouvrage peut présenter une longueur importante, égale à 2 ou 3 fois la largeur de la rivière ; cette disposition oblique est particulièrement favorable, car elle permet de limiter l'élévation du niveau amont en cas de crue : à débit donné, plus la longueur de l'ouvrage est importante et plus la hauteur de surverse est faible.



Coupe d'un seuil fixe traditionnel



Coupe d'un seuil fixe maçonné

- De nombreux seuils présentent une section triangulaire : ils sont constitués d'une carapace de pierres maçonnées ou hourdées (posées sur un lit de mortier) plus ou moins épaisse, recouvrant un remblai de matériaux tout-venant. Dans certains cas, la crête de l'ouvrage est rehaussée et renforcée d'une rangée de pierres de taille. L'ouvrage est souvent prolongé vers l'aval par un radier de faible pente qui limite l'érosion dans la zone où est dissipée l'énergie de la chute d'eau.
- D'autres seuils, moins répandus que les précédents, présentent une structure maçonnée verticale.

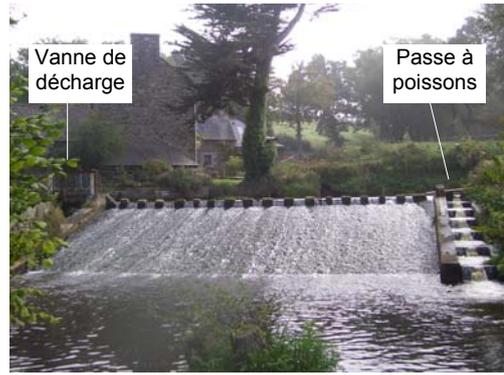
Ces ouvrages sont simples, robustes, fiables et ne demandent qu'un suivi sommaire. Toutefois, comme ils ne comportent aucun organe permettant de régler l'écoulement, ils occasionnent, par forts débits, une élévation du niveau de la retenue, pouvant provoquer des inondations.

b. Les seuils munis de vannes de décharge :

Ces ouvrages sont semblables aux précédents, mais ils intègrent, sur une certaine partie de leur longueur, des vannes de décharge, généralement verticales, identiques à celles qui seront décrites au paragraphe suivant. Lors des crues, l'ouverture de ces vannes permet d'accroître le débit de l'écoulement et donc de mieux contrôler l'élévation du niveau en amont de l'ouvrage. Elles permettent également d'évacuer régulièrement les sédiments retenus par le seuil.



Seuil fixe sur le Gardon de Mialet (30)



Seuil avec vanne de décharge (22)

Faute d'un suivi régulier, les ouvrages des deux familles précédentes peuvent être affectés par divers désordres, tels que :

- l'arrachage des pierres du parement aval ;
- le développement de la végétation arbustive entre les pierres du parement ;
- le contournement latéral de l'ouvrage par le cours d'eau, du fait de l'absence ou de la destruction d'un bajoyer (muret de protection des berges) ;
- le démantèlement par sous-cavage du pied aval de l'ouvrage, où est dissipée l'énergie de la chute.

Ces dégradations qui peuvent aboutir, à plus ou moins long terme, à la ruine totale de l'ouvrage, devront être diagnostiquées et traitées en priorité lors de la remise en service d'un aménagement. Pour ce faire, on se référera aux publications du CEMAGREF d'Aix en Provence, qui a mené des études approfondies portant sur le diagnostic, la restauration et l'entretien ultérieur des seuils¹.

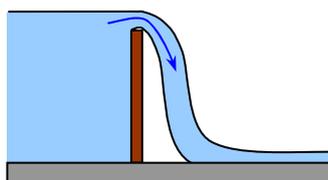
c. Les barrages mobiles :

Ce type d'ouvrage est constitué d'un ensemble de vannes disposées perpendiculairement à l'axe du cours d'eau. Ces organes mobiles permettent de contrôler parfaitement les conditions de l'écoulement.

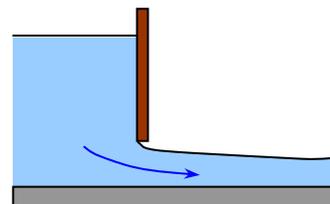
Les ouvrages traditionnels utilisent des vannes coulissantes verticales en bois, en acier ou en fonte, portées et guidées par des glissières métalliques ou par des piliers, souvent maçonnés en pierres de taille. Lorsque le débit du cours d'eau est modéré, les vannes sont fermées : leur partie inférieure repose sur le seuil de l'ouvrage. Elles jouent alors le rôle d'un déversoir. Par eaux plus fortes, les vannes sont levées, ce qui favorise l'écoulement d'un débit important et limite la montée du niveau de la retenue.



Barrage mobile sur la Zorn (67)



Vanne fermée :
le débit déversé est faible



Vanne ouverte :
le débit de l'écoulement est élevé

¹ S. Merkle – CEMAGEF - Diagnostic intégré et restauration des seuils en rivière – publié dans L'écho de l'eau (N°7) et dans les numéros 43 et 44 de la revue « Moulins de France », de la FFAM.
CEMAGREF & EPIDOR - Guide technique - Restauration et entretien des seuils – Bassin de la Cère.

En raison du rôle fondamental joué par un tel ouvrage, ses dégradations devront être diagnostiquées et traitées en priorité lors de la réhabilitation d'un aménagement.

En particulier, il sera indispensable :

- d'éliminer la végétation qui se serait développée entre les pierres des piliers, puis de rejointoyer celles-ci, tant du côté aval qu'amont, après avoir vérifié leur alignement. Un mélange mortier - époxy pourra être injecté dans les vides subsistant entre les pierres ;
- de s'assurer du bon état du pied de l'ouvrage et de remédier, le cas échéant, à tout sous-cavage, en suivant la méthode préconisée par le CEMAGREF pour les seuils fixes ;
- de vérifier l'état des vannes et de leur mécanisme de commande, et de procéder à leur remplacement, si nécessaire.

Les vannes des ouvrages anciens sont commandées manuellement par l'intermédiaire d'un cric, constitué d'un mécanisme à crémaillère actionné par une manivelle.

Sur une installation moderne destinée à fonctionner sans surveillance humaine, l'ouverture des vannes sera commandée par un système automatisé contrôlant le niveau de la retenue d'eau. Ce dispositif, généralement construit autour d'un automate programmable, actionne les vannes par l'intermédiaire d'un vérin hydraulique ou d'un moto-réducteur électrique.

- La commande hydraulique implique la mise en œuvre d'une centrale oléo-hydraulique constituée d'une pompe entraînée par un moteur électrique et associée à un réservoir d'huile. Ce système sera de préférence complété par une pompe de secours manuelle permettant d'actionner les vérins en cas de coupure du courant ou de défaillance du dispositif de commande ; mais en cas de fuites d'huile, il peut provoquer la pollution du cours d'eau.
- La commande électrique n'engendre pas ce type de risque ; de plus, elle peut être très facilement doublée d'une commande manuelle, indispensable pour manœuvrer la vanne en cas de coupure de l'alimentation électrique ou de dysfonctionnement du dispositif de commande.

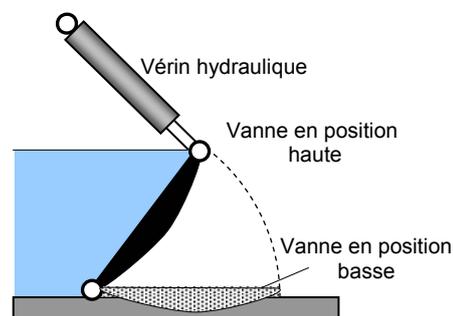


Vanne à commande électrique et manuelle

Lors d'une réhabilitation, les vannes verticales peuvent être remplacées par des vannes clapets, habituellement actionnées par un treuil électrique ou un vérin hydraulique. Ces vannes pivotent autour d'un palier fixé à la base de l'ouvrage. Par rapport aux vannes verticales, elles présentent l'avantage de pouvoir s'effacer complètement en cas de crue et donc de ne plus opposer de résistance au passage de l'eau. De plus, leur ouverture, qui s'effectue sous l'effet de la poussée de l'eau, ne demande aucune énergie.



Vanne clapet sur la Zorn (67)



Principe de fonctionnement

En définitive, les barrages mobiles permettent un contrôle efficace de l'écoulement et de la hauteur d'eau de la retenue en amont de l'ouvrage, mais ils exigent une maintenance régulière, et leur commande requiert une source d'énergie (électrique, hydraulique ou musculaire).

De plus, le risque qu'une vanne reste bloquée à un moment crucial subsiste toujours.

2. Les organes associés :

a. La grille de protection et les dégrilleurs :

La prise d'eau d'une centrale est munie d'une grille qui protège le moteur hydraulique des débris charriés par le cours d'eau, tels que le bois, les feuilles mortes ou les débris issus de l'activité humaine. Elle est constituée d'un ensemble de barreaux associés en parallèle.

L'écartement de ces barreaux dépend du type du moteur hydraulique. Dans le cas d'une vis hydrodynamique, peu sensible aux débris flottants, cet écartement peut être relativement important (10 à 20 cm), alors qu'il doit être bien plus réduit (12 à 20 mm) dans le cas d'une turbine. Sur certaines rivières, l'administration peut même imposer un écartement maximal de 8 mm afin d'épargner aux poissons un passage mortel par la turbine.

Une grille de faible écartement doit être nettoyée régulièrement, en particulier à l'époque de la chute des feuilles, afin d'éviter tout colmatage. Ce nettoyage peut être effectué automatiquement par un dégrilleur.

Deux technologies sont couramment mises en œuvre sur les petites centrales :

- **Le dégrilleur à chaîne** : un râteau est entraîné par deux chaînes actionnées par des roues dentées. Guidé par les chaînes, le râteau est amené au bas de la grille, puis plaqué contre celle-ci. Au cours de sa remontée, le râteau racle la grille, puis déverse les débris dans une goulotte d'évacuation.

Cet appareil est actionné par un moteur électrique qui ne génère aucun risque de pollution, mais l'installation et la maintenance du dégrilleur nécessitent la mise à sec du canal d'amenée.

- **Le dégrilleur hydraulique** : le râteau est porté par un bras articulé semblable à celui d'une pelleuse, actionné par des vérins hydrauliques. Le mouvement du râteau est identique à celui décrit ci-dessus.

Cet appareil présente l'avantage de pouvoir être installé et entretenu sans nécessiter la mise à sec de l'ouvrage. Cependant, sa commande hydraulique implique la mise en œuvre d'une centrale oléo-hydraulique et peut être à l'origine de pollutions, en cas de fuites d'huile.



Dégrilleur à chaîne

Doc. VIRY



Dégrilleur hydraulique

Dans les deux cas, l'action du dégrilleur est commandée soit de façon cyclique, soit par un dispositif détectant le colmatage de la grille.

b. Les vannes :

Les vannes permettent de contrôler un débit, de détourner un écoulement, d'isoler certains organes tels que le moteur hydraulique,....

Les vannes les plus fréquemment utilisées au niveau des microcentrales de basse chute sont les vannes coulissantes verticales, déjà décrites au § 1.c, en même temps que leurs fonctions au niveau des barrages.

La vanne implantée au niveau de la prise d'eau contrôle l'alimentation du canal d'amenée

Sur ce même ouvrage, la **vanne de décharge** assure la vidange de ce canal, en cas de besoin.

La **vanne de garde** est installée immédiatement en amont du moteur hydraulique. Elle permet d'isoler celui-ci du canal d'amenée, en vue d'opérations de maintenance et en cas de fonctionnement anormal, en particulier lors de la coupure accidentelle du réseau électrique.

En effet, dans cette situation, la génératrice ne freine plus le moteur hydraulique, qui monte en survitesse. La vanne de garde doit alors interrompre l'écoulement pour éviter la détérioration du groupe moteur - génératrice.

Cette vanne sera de préférence conçue pour se fermer automatiquement et sans apport d'énergie, par gravité ou par la poussée d'Archimède, en cas de coupure du réseau ou de dysfonctionnement majeur de l'installation.

VI. Les moteurs hydrauliques :

Le moteur hydraulique assure la conversion de l'énergie de l'écoulement de l'eau en énergie mécanique de rotation, exploitable par le générateur électrique de la centrale.

Tandis que dans les grandes centrales hydrauliques, ce rôle est réservé aux turbines en raison des pressions ou des débits considérables qui y sont mis en jeu, les microcentrales de basse chute, qui nous intéressent ici, peuvent être équipées de machines appartenant aux trois familles suivantes :

- les turbines hydrauliques ;
- les roues à aubes ;
- les vis hydrodynamiques.

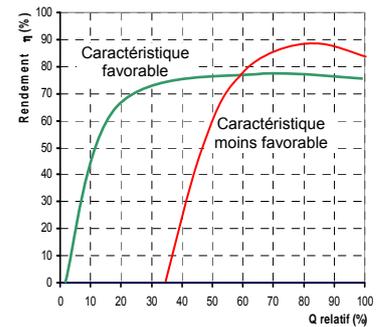
Le moteur hydraulique constitue le « cœur » de la centrale : les performances, la production d'énergie, mais aussi le coût et le temps de retour sur investissement de l'installation dépendent fortement de ses caractéristiques.

Chaque famille et chaque type de moteur présente ses particularités, ses points forts et ses points faibles que nous devons considérer attentivement avant d'effectuer notre choix. Nous devons en particulier prendre en compte les aspects suivants :

- **le rendement** : bien que l'énergie hydraulique soit gratuite et indéfiniment renouvelable, sa mise en valeur nécessite d'importants moyens techniques et financiers, et exige un fort engagement de la part du porteur du projet. Ces différents investissements ne seront pleinement valorisés que par une installation permettant de tirer le meilleur parti possible de la puissance mise à disposition par le cours d'eau. Ceci implique le choix d'un moteur hydraulique présentant un bon rendement.

Lorsque le débit disponible d'un cours d'eau est susceptible de varier dans d'importantes proportions au cours de l'année, nous devons considérer non seulement le rendement nominal ou maximal du moteur, mais également l'évolution de ce rendement en fonction du débit. En effet, dans ces conditions, une machine présentant un rendement correct sur une large plage de débits produira de l'énergie pendant la majeure partie de l'année, tandis qu'une autre, de rendement supérieur, mais sur une plage de débit restreinte, sera à l'arrêt la plupart du temps et ne fournira en définitive qu'une quantité d'énergie moindre.

Nota : la courbe de rendement, établie par le fabricant, donne l'évolution du rendement de la machine en fonction de son débit relatif, égal au rapport entre le débit effectif et le débit nominal.



Courbes de rendement de moteurs hydrauliques

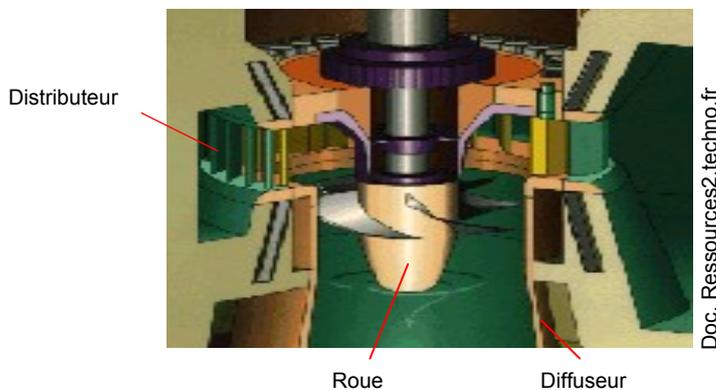
- **la vitesse de rotation** : les microcentrales sont habituellement équipées de génératrices électriques standard, dont la vitesse nominale est comprise entre 750 et 1500 tr/min. Le moteur hydraulique, qui tourne toujours à une vitesse inférieure à ces valeurs, entraîne la génératrice par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. Plus la vitesse du moteur est basse, et plus le multiplicateur sera complexe, onéreux et exigeant en maintenance.
- **les possibilités d'implantation du moteur dans l'ouvrage existant** sont à considérer attentivement, étant donné que notre objectif sera de réhabiliter un site en minimisant les interventions, toujours coûteuses, tout en préservant le cadre naturel et architectural.
- **les équipements associés** : en fonction du type du moteur hydraulique, un certain nombre d'équipements seront ou non indispensables. Par exemple, la prise d'eau d'une turbine en siphon devra être munie d'une grille de protection de pas réduit, mais pourra se passer de vanne de garde, indispensable avec une vis hydrodynamique.
- **le coût d'investissement global** : nous devons prendre en compte non seulement le coût du moteur hydraulique et des équipements associés, mais également celui du génie civil, du montage de ses différents constituants et de leur transport.
- **l'impact sur la faune aquatique**, en particulier sur les poissons, est également un critère de choix important sur une installation qui se veut exemplaire du point de vue environnemental.

1. Les turbines hydrauliques :

Le développement de l'hydroélectricité a été indissociable de celui des turbines, de sorte que dans l'esprit d'une majorité de personnes, la centrale hydraulique évoque inévitablement la turbine.

Une turbine hydraulique destinée aux installations de basse chute comporte trois parties :

- La roue, l'élément tournant, assure la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique. Elle est munie d'aubes ou de pales qui, en fonction du type de la machine, peuvent être fixes ou orientables.
- Le distributeur, la partie statique située en amont de la roue, sert à diriger de manière optimale l'eau vers l'aubage de la roue. S'il est muni d'aubes orientables, il permet également de contrôler le débit de l'eau dans la machine.
- Le diffuseur ou aspirateur, en aval de la roue, est une conduite divergente qui permet à la machine d'exploiter le hauteur de chute séparant la sortie de la roue du niveau du canal de restitution et, sur les turbines à réaction, de récupérer une partie de l'énergie cinétique restant à l'eau qui quitte la roue.



On distingue deux familles de turbines :

- Les **turbines à action** exploitent l'énergie cinétique (liée à la vitesse) d'un jet qui se forme à la sortie de leur distributeur, du fait de la pression de l'eau. Leur roue est dénoyée, c'est à dire tourne à l'air, à une pression voisine de la pression atmosphérique. Ce principe de fonctionnement destine ces machines aux installations de haute chute. Néanmoins, la turbine à flux traversant, qui appartient à cette famille, est susceptible, avec certaines réserves, d'être utilisée en basse chute.
- Les **turbines à réaction** exploitent l'énergie cinétique et l'énergie potentielle (liée au poids) de l'eau. Leur roue est totalement immergée. La pression exercée par l'eau sur les pales de la roue induit des forces qui entraînent la rotation de celle-ci. Les turbines à réaction, en particulier les turbines Kaplan, sont parfaitement adaptées aux installations de basse chute.

Avantages et inconvénients :

Les turbines couvrent de très larges plages de hauteurs de chute et de débits, pour un domaine de puissances allant de quelques kW à plusieurs centaines de MW. Certaines familles sont déclinées en de nombreuses variantes permettant une adaptation parfaite aux particularités des sites à équiper. Par ailleurs, plusieurs entreprises se sont spécialisées dans la fabrication de turbines dédiées aux microcentrales.

Ces machines présentent habituellement des rendements élevés : celui d'une turbine standard moderne fabriquée en série dépasse 80% ; celui d'une turbine optimisée par un laboratoire spécialisé, en fonction des caractéristiques propres du site de destination, peut même atteindre 90%.

Du fait de leur vitesse de rotation élevée, de l'ordre de plusieurs centaines de tours par minute, le rapport du multiplicateur de vitesse est peu élevé ; aussi, cet appareil se réduit-il souvent à un simple système de transmission poulies - courroie plate, bon marché, de rendement élevé et ne réclamant qu'une maintenance sommaire.

Enfin, les turbines sont des moteurs hydrauliques compacts. A l'exception, peut être de celles destinées aux très basses chutes (de moins de 2 mètres), une turbine occupera, à puissance donnée, un volume plus réduit et présentera une masse plus faible que les solutions alternatives.

Cependant, les turbines, qui comportent fréquemment de nombreux éléments réglables, sont des machines complexes et onéreuses. De ce fait, une turbine installée sur une très basse chute de faible puissance sera difficilement rentabilisée.

Ces machines sont par ailleurs sensibles aux débris flottants, qui sont susceptibles de perturber leur fonctionnement, voire de les endommager. Leur prise d'eau doit donc être protégée par une grille de pas réduit. Pour éviter l'obstruction de cette dernière, en particulier lors de la chute des feuilles, l'utilisation d'un dégrilleur automatique, chargé de retirer ces débris, s'impose. Ceci implique la nécessité de gérer les déchets retirés de l'eau. Grille et dégrilleur automatique augmentent sensiblement le coût d'une installation. De plus, cette grille occasionne des pertes de charge qui diminuent un peu le rendement de l'installation.

Le passage des poissons par les turbines, au cours de leur devalaison, comporte des risques importants, en raison des accélérations et des décélérations brusques de l'écoulement, des gradients de pression et des chocs, qui peuvent engendrer stress et blessures¹. Bien que des laboratoires s'efforcent de concevoir des turbines à faible mortalité (fish friendly turbines), la turbine à mortalité nulle reste à inventer. Sur les petites centrales, la grille de protection, déjà évoquée ci-dessus, permet d'empêcher le passage des gros poissons. A cet effet, l'administration peut imposer l'écartement maximal des barreaux de la grille en fonction du peuplement piscicole du cours d'eau (exemple : 8 mm sur certains sites !) et d'aménager un passage permettant la dévalaison des poissons.

Enfin, comme la roue et les différents constituants d'une turbine restent invisibles en dehors des opérations de maintenance, leur portée didactique est plus limitée que celle des roues à aubes ou des vis hydrodynamiques, sur lesquelles le travail de l'organe moteur bien mis en évidence. Cet effet peut cependant être facilement corrigé au moyen d'illustrations ou de modèles réduits.

a. Les turbines Francis :

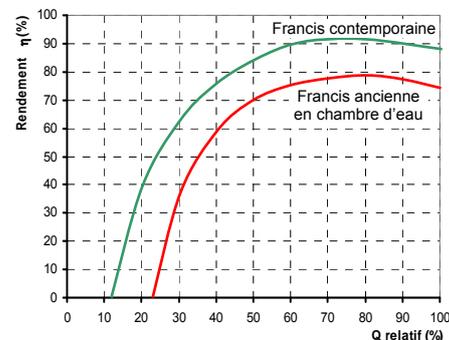
La turbine Francis est une machine à réaction ; elle comporte une roue à aubage fixe, associée à un distributeur muni d'aubes directrices orientables.

Les turbines Francis actuelles, équipées d'un conduit d'alimentation en colimaçon appelé bêche spirale, sont des machines parfaitement adaptées aux chutes moyennes, d'une hauteur comprise entre 10 et 200 m, et qui sortent du cadre de cette étude....



Distributeur (en jaune) et roue (en rouge) de turbine Francis

Doc. ADEME



Courbes de rendement

¹ D'après l'Office Fédéral de l'Energie (CH), le taux de mortalité moyen des poissons atteint 37% dans les turbines Francis et 9% dans les turbines Kaplan. (Petites centrales hydrauliques et écologie des eaux).

Cependant, au cours de la première moitié du XX^e siècle, un grand nombre d'aménagements de basse chute furent munis de turbines Francis en chambre d'eau ouverte, c'est-à-dire immergées dans un réservoir assurant l'alimentation du distributeur sans préorientation de l'écoulement.

De nombreux moulins furent ainsi équipés, que ce soit pour assurer l'entraînement de machines à partir d'un arbre de transmission ou pour produire de l'énergie électrique. Toutefois, la construction de la chambre d'eau a toujours imposé d'importants et coûteux travaux de génie civil, qui ont souvent modifié considérablement la physionomie des sites.

Il faut noter que le rendement de ces anciennes turbines est inférieur à celui des machines actuelles. Au point nominal, il est souvent compris entre 60 et 80%, et il diminue fortement à faible charge, de sorte que les débits exploitables sont habituellement compris entre 50 et 100% de la valeur nominale. Pour pallier cet inconvénient, de nombreux sites furent équipés de plusieurs groupes de puissances échelonnées. Par exemple, certaines microcentrales sont munies de deux turbines dont les débits nominaux représentent respectivement 1/3 et 2/3 du débit d'équipement. En fonction du débit du cours d'eau, elles fonctionnent soit séparément, soit simultanément, de manière à optimiser la production d'énergie. Une telle solution présente toutefois un surcoût évident.

Par ailleurs, la faible vitesse de rotation de ces turbines, de l'ordre d'une centaine de tours par minute, implique un rapport de transmission conséquent entre la turbine et la génératrice.

Pour ces différentes raisons, équiper de nos jours un moulin d'une turbine Francis, par exemple achetée d'occasion, n'est pas une opération à recommander. D'autres solutions, parfaitement adaptées aux installations de basse chute, sont techniquement et économiquement bien plus satisfaisantes.

Par contre, sur une installation de petite puissance (< 50 kW), déjà pourvue d'une turbine Francis et dont les différents ouvrages sont en bon état, la réfection de la turbine (Voir Fiche 4) et le remplacement de l'équipement électrique (génératrice et tableaux) peuvent assurer une remise en service à moindres frais.

b. Les turbines Hélice et Kaplan :

Ces turbines à réaction sont parfaitement adaptées aux basses chutes. Leur roue a la forme d'une hélice de bateau ; elle est munie de 3 à 8 pales.

Alors que les pales de la roue hélice sont fixes, celles de la roue Kaplan sont orientables : leur angle d'inclinaison est habituellement réglé par une centrale oléo-hydraulique actionnant une tige de commande.

La roue est associée à un distributeur muni d'aubes directrices soit fixes, soit orientables ; ceci nous donne les 4 variantes suivantes, de complexité et de coût croissants :

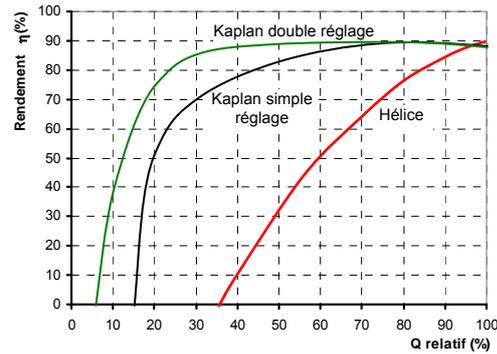
- roue hélice et distributeur fixe : cette solution, qui n'offre aucune possibilité de réglage, n'est adaptée qu'à des puissances et des débits constants. Cependant, sur un cours d'eau de débit important, un ensemble de turbines hélices fonctionnant par paliers, comme les turbines Francis évoquées ci-dessus, peut permettre une exploitation efficace et économique d'une installation au fil de l'eau.
- roue hélice et distributeur réglable : cette variante ne possède qu'une capacité de réglage réduite ; elle peut équiper les sites où la variation de débit est faible.
- roue Kaplan et distributeur fixe : cette machine, appelée turbine Kaplan à simple réglage, présente une bonne capacité d'adaptation aux variations du débit : elle permet d'exploiter avec un bon rendement les débits compris entre 30 et 100% de la valeur nominale.
- roue Kaplan et distributeur réglable : cette machine, appelée turbine Kaplan à double réglage, permet d'exploiter efficacement des débits variant entre 15 et 100% de la valeur nominale. Pour optimiser le rendement, à chaque valeur du débit correspond un réglage des pales de la roue et un réglage des directrices du distributeur. Sur les machines modernes, ces réglages sont gérés par un automate.

Cette turbine est habituellement très performante, mais du fait du nombre élevé de ses éléments mobiles, elle est onéreuse et d'une grande complexité.



Doc. AJENA

Roue de turbine Kaplan



Courbes de rendement

Ces machines sont parfaitement adaptées aux chutes d'une hauteur de 2 à 18 m. Certaines variantes sont même optimisées pour des chutes plus basses, de 0,5 à 2 m.

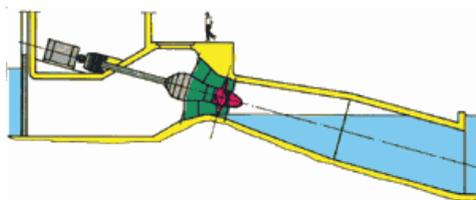
Elles couvrent une gamme de puissances très étendue, débutant à quelques kW, pour des débits supérieurs à $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ces turbines sont déclinées en un grand nombre de variantes, ce qui garantit leur adaptabilité à des sites très variés :

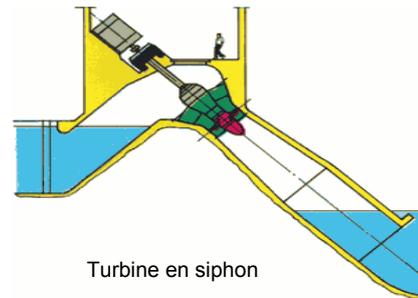
Comme la turbine Francis, la turbine Kaplan peut être alimentée par une chambre d'eau. Cette solution, courante sur les anciennes installations, n'assure pas les meilleurs rendements, nécessite d'importants travaux de génie civil et la réalisation de formes élaborées, en particulier au niveau de l'échappement. Elle n'est pas à recommander pour de nouvelles réalisations.

Les turbines à écoulement axial présentent une grande souplesse d'intégration et un excellent rendement ; elles existent sous différentes variantes :

- Les turbines axiales en S ou inclinées, implantées dans l'axe d'une conduite, permettent une réhabilitation aisée des sites existants, tout en minimisant les coûts.



Turbine axiale inclinée

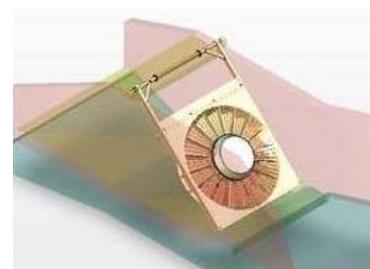


Turbine en siphon

Doc. Labarthe

- La turbine en siphon s'implante facilement dans les ouvrages existants et ne demande que très peu de génie civil. Elle permet aussi de se passer de vanne de garde : le groupe est démarré en amorçant le siphon par une pompe à vide, et arrêté en ouvrant une soupape. Cependant, les siphons peuvent être bruyants et l'esthétique n'est pas toujours au rendez-vous.

- La turbine VLH (very low head) est construite autour d'une turbine Kaplan de grand diamètre et de faible vitesse de rotation, entraînant en prise directe un alternateur à aimants permanents. La turbine est montée sur une structure autoporteuse qui simplifie considérablement son implantation dans les ouvrages. Un prototype de cette turbine a été installé sur l'Hérault, à Millau. Cependant, pour l'instant, sa fabrication n'est envisagée que pour des puissances supérieures à 100 kW.



Doc. MJ2 Technologies

c. La turbine à flux traversant (Crossflow ou Banki-Mitchell) :

Cette machine tire son nom du fait que l'écoulement traverse 2 fois la roue, la première fois de l'extérieur vers l'intérieur, et la seconde fois, de l'intérieur vers l'extérieur. Elle est la seule turbine à action susceptible d'être employée sur une installation de basse chute.

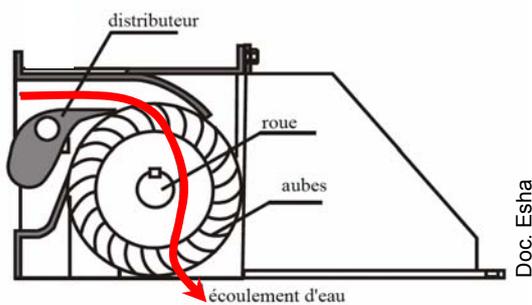
La turbine à flux traversant est équipée d'une roue cylindrique portant une couronne d'aubes fixes. Son distributeur comporte une aube orientable permettant de contrôler le débit et de diriger de manière optimale le flux de liquide sur l'aubage de la roue.

Sur une installation de basse chute, cette machine est munie d'un aspirateur qui lui permet d'exploiter la hauteur de chute séparant la sortie de la roue du niveau du canal de restitution.

Ces turbines peuvent fonctionner sur des chutes de 1 à 200 mètres, pour des puissances nominales allant de quelques kW à plusieurs MW.

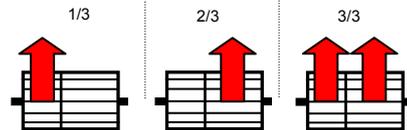
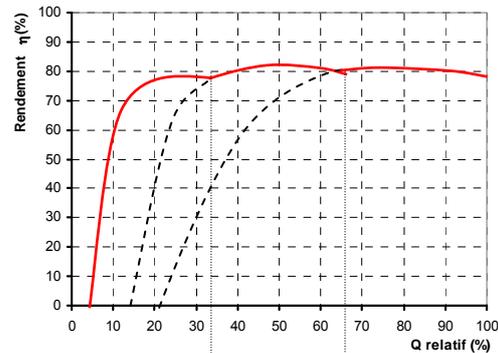
La constitution de ces machines étant très simple, leur fabrication est peu coûteuse et leur maintenance aisée. Comme l'eau traverse deux fois la roue, cette turbine passe pour être auto-nettoyante : les feuilles collées sur l'aubage à l'entrée de la roue sont chassées par l'eau à sa sortie.

Habituellement, cette machine est divisée en 2 secteurs qui représentent respectivement 1/3 et 2/3 de sa largeur. Ces secteurs, qui peuvent être alimentés séparément ou simultanément, lui permettent de s'adapter efficacement à une large plage de débits. De ce fait, cette turbine présente un rendement quasi-constant pour des débits relatifs compris entre 20 à 100%.



Turbine à flux traversant

Doc. Esha



Courbe de rendement et principe du fonctionnement 1/3 - 2/3 - 3/3

Cependant, ce rendement, de l'ordre de 80 à 85%, est légèrement inférieur à celui des autres turbines contemporaines optimisées en laboratoire. En raison de sa largeur, l'implantation de cette machine dans un ouvrage existant peut entraîner d'importants travaux de génie civil, à moins qu'on ne l'installe dans la chambre d'eau d'une ancienne turbine Francis.

Enfin, par sa nature même de turbine à action, cette machine pose deux problèmes, lorsqu'elle est utilisée en basse chute :

- Premièrement, sa roue doit être dénoyée, c'est-à-dire doit tourner à l'air. Ceci empêche la machine d'exploiter une certaine hauteur de la chute, légèrement supérieure au rayon de la roue. Cet effet, qui est parfaitement négligeable en haute chute, peut représenter en basse chute une perte de puissance supérieure à 10%.
- Ensuite, cette roue devrait exploiter l'action d'un jet. Cependant, en basse chute, le potentiel d'accélération de l'écoulement est faible. Il s'ensuit, comme le signalent l'Office Fédéral de l'Energie¹ (Suisse) et l'Association Européenne de la petite Hydroélectricité² (ESHA), une prédominance des forces gravitaires sur les forces d'inertie, pouvant entraîner une dégradation du comportement mécanique de la machine et réduire la durée de vie de son aubage.

¹ OFEN - Site Internet : www.smallhydro.ch

² ESHA - Petite Hydroélectricité - Guide technique pour la réalisation de projets.

2. Les roues à aubes :

Certains d'entre vous s'étonneront de voir figurer la roue à aubes, cette machine millénaire, parmi les dispositifs susceptibles d'équiper les microcentrales hydroélectriques du XXI^e siècle !

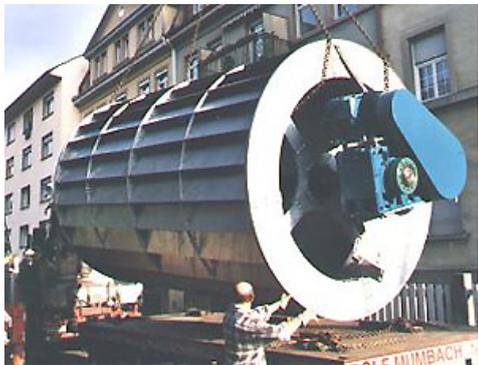
Effectivement, les roues à aubes n'ont pas participé au développement de l'hydroélectricité. Souvent conçues de manière empirique, réalisées en bois ou en un assemblage de bois et de métal, elles ne présentaient ni les performances, ni la durabilité des turbines. De plus, leur faible vitesse de rotation et leur fort couple moteur, parfaitement adaptés à l'entraînement direct des meules, n'en faisaient pas les machines idéales à associer aux génératrices électriques.

Du fait de leur image de machine du passé, leurs qualités et leurs véritables performances restent souvent méconnues : un guide récent de la petite hydroélectricité ne les crédite-t-il pas d'un rendement de 20 à 30% ?

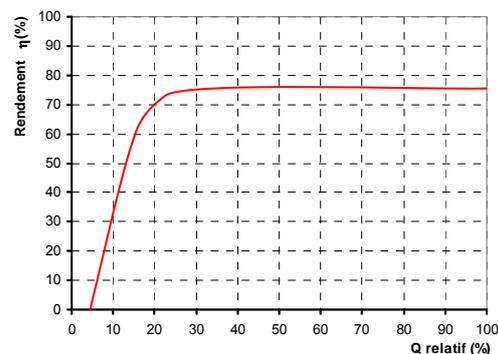
Aussi sont-elles actuellement le plus souvent reléguées à un rôle purement décoratif, à moins qu'elles n'équipent des moulins-musées restaurés à l'identique et destinés à faire revivre les métiers et les techniques d'autrefois.

Cependant, malgré l'hégémonie des turbines, les roues à aubes, ces figures emblématiques des moulins, continuent à passionner des chercheurs¹ et à inspirer des fabricants de machines hydrauliques. Elles ont tiré parti, dès le XIX^e siècle, des progrès de l'hydrodynamique et bénéficient de nos jours de toutes les techniques modernes, tant au niveau de la conception (calcul et simulation numériques,...), qu'au niveau de la fabrication (utilisation des aciers inoxydable ou Corten*, découpe laser, multiplicateurs à haut rendement...). Ainsi, leurs performances et leurs qualités ont pu être optimisées.

En Allemagne, où l'on assiste à une véritable renaissance de ces machines, plusieurs fabricants proposent divers modèles « high-tech ».



Installation d'une roue à Fribourg (D)
Ø : 2,9 m ; largeur : 4m



Courbe de rendement d'une roue en dessus

La puissance nominale des machines actuelles est habituellement comprise entre 1 et 75 kW ; elle peut atteindre exceptionnellement 100 kW. Les hauteurs de chute accessibles, de 0,5 à 10 m, dépendent du type de la roue.

Avantages et inconvénients :

Les roues à aubes modernes sont des machines simples et robustes. Elles sont peu sensibles aux feuilles ou aux débris véhiculés par l'eau, et ne nécessitent donc pas de grille de protection de pas réduit, contrairement aux turbines. Leur rendement reste quasiment constant sur une grande plage de débit, sans le moindre réglage. Du fait de leur faible vitesse de rotation et des faibles pressions mises en jeu, elles permettent la dévalaison des poissons avec un risque de mortalité nul. Comme elles se substituent parfaitement aux anciennes roues dans les ouvrages existants, les travaux de génie civil sont minimisés. Leur esthétique est bien acceptée et peut

¹ En particulier : Dr Gerald Muller, de l'Université de Southampton. : Water wheels as a power source.

même mettre un site en valeur. Enfin, à des fins didactiques, elles mettent bien en évidence le travail de l'eau.

Cependant, on peut leur reprocher leur faible vitesse de rotation, souvent voisine, voire inférieure à la dizaine de tours par minute, qui impose l'emploi d'un multiplicateur de vitesse présentant un rapport de multiplication élevé, souvent proche de 100, et un haut rendement, pour entraîner les génératrices électriques.

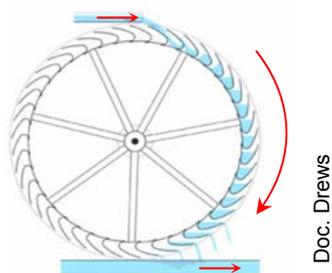
A puissance donnée, la masse et l'encombrement des roues sont habituellement bien plus importants que ceux des turbines. Cette remarque doit cependant être nuancée quant aux très basses chutes : les turbines qui leur sont destinées présentent (en particulier, si l'on tient compte de la grille de protection, du dégrilleur, du diffuseur,...) une masse plus importante que certaines roues modernes.

Dans les régions à hivers rigoureux, les roues doivent être protégées du gel, qui peut les immobiliser, voire les endommager. Enfin, le passage de l'eau sur les aubes peut générer des nuisances sonores présentant des composantes de très basse fréquence, peu appréciées.

En fonction de leur point d'alimentation, on distingue les types de roues suivants :
(Le terme **capacité** désigne le débit maximal que peut absorber une roue par mètre de largeur)

a. Les roues (alimentées) en dessus :

Elles sont alimentées en leur partie supérieure par un canal d'amenée. Leur aubage est constitué d'augets portés par deux couronnes latérales. Ces roues exploitent uniquement l'énergie potentielle de l'eau : une fois dans les augets, l'eau est pratiquement immobile et travaille uniquement par gravité.



Principe de la roue en dessus



Roue en dessus « Turas »

Ces roues sont employées sur des chutes de 2,5 à 10 m et elles présentent habituellement des capacités de 0,1 à 0,2 m³/s par mètre. Leur vitesse tangentielle avoisine 1,5 m/s.

Les roues en dessus traditionnelles présentent des rendements compris entre 65% et 75%. Celui des roues actuelles en acier, dont l'usage se répand en Allemagne, peut atteindre 85%¹.

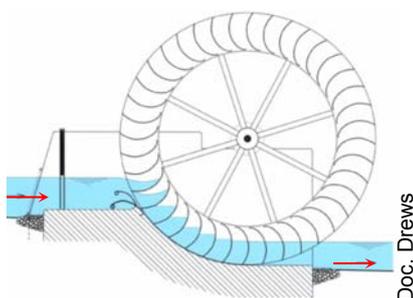
Il faut cependant noter que ce type de roue ne permet pas d'exploiter l'intégralité de la hauteur d'une chute : en effet, au point bas, les augets se déplacent dans le sens opposé à celui de l'écoulement dans le canal de fuite. Il faut donc prévoir une hauteur de garde suffisante pour éviter que l'aubage ne barbotte dans le canal de fuite, en particulier en période de hautes eaux.

b. Les roues de côté :

Elles sont alimentées en dessous du niveau de leur axe. Leur aubage peut être constitué d'augets ou de pales. Ces roues exploitent l'énergie potentielle de l'eau, mais certaines peuvent également tirer profit d'une partie de l'énergie cinétique de l'écoulement.

¹ Michel DUBAS - Design and efficiency of overshot waterwheels – University of Applied Sciences - Sion (CH).

Les roues de côté conventionnelles sont employées sur des chutes de 1,5 à 4 m, et présentent habituellement des capacités de 0,3 à 0,85 m³/s par mètre. Leur débit est contrôlé par une vanne d'admission, généralement inclinée,



Principe de la roue de côté



Roue Zuppinger ; Notez la présence du bloc palier-multiplicateur-génératrice.

Alors que le rendement des anciennes roues de côté est compris entre 35 et 65%, celui des réalisations actuelles atteint 80%. Récemment, le laboratoire des énergies renouvelables de l'Université de Belfast (UK) a réalisé une maquette de roue de côté présentant, après optimisation de l'admission et de l'échappement de l'eau, un rendement de 87% pour des débits compris entre 10 et 100% de la valeur nominale¹ !

Au XIX^e siècle, les ingénieurs Sagebien, en France, et Zuppinger, en Suisse, inventèrent des machines apparentées aux roues de côté et qui exploitent uniquement l'énergie potentielle de l'eau. Destinées à des chutes plus basses et possédant une capacité plus importante que ces dernières, elles présentent des rendements de l'ordre de 75% (certains écrits avancent même la valeur de 90% pour la roue Sagebien !).

La fabrication des roues Zuppinger a repris Allemagne : quinze sites en furent équipés au cours des dix dernières années. Cette machine convient à des chutes de 0,5 à 2,5 m et sa capacité est comprise entre 0,5 et 1,5 m³/s par mètre. Sa vitesse tangentielle avoisine 1,5 m/s. Cependant, de conception plus que centenaire, cette roue présente, à puissance donnée, une masse et un encombrement très importants. Par exemple, la roue de Naabtal (D), prévue pour fournir une puissance électrique nominale de 20 kW sur une chute d'un mètre, a un diamètre de 6,5 m, une largeur de 2,3 m et une masse de 15 tonnes !²

En France, l'ingénieur M. Fonfrède a conçu en 2002 une roue-barrage, également apparentée aux roues de côté, qui est actuellement commercialisée. Cette machine a été spécialement conçue dans le but de remettre en valeur, à moindre coût, les anciennes installations de basse chute, tout en préservant la faune aquatique.

Prévue pour des chutes de 1 à 5 m, elle présente des performances similaires à celles de la roue Zuppinger, mais la présence d'un barrage fixe intégré à la roue en fait une machine bien plus compacte, plus légère et plus économique. Après d'ultimes optimisations, elle devrait atteindre le même rendement que la roue de l'Université de Belfast.



Roue Fonfrède

c. Les roues en dessous :

Elles sont attaquées par l'eau à leur niveau inférieur et exploitent uniquement l'énergie cinétique de l'écoulement. De ce fait, leur rendement est nettement inférieur à celui des types précédents.

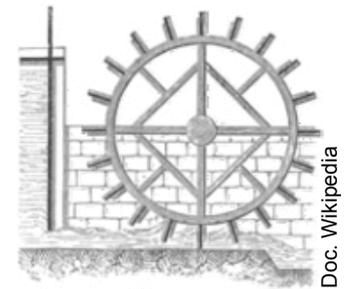
¹ G. MULLER et C. WOLTER - The breastshot waterwheel : design and model tests.

² Voir le site : www.hydrowatt.de

Ces roues sont traditionnellement mises en œuvre sur des chutes de 0,5 à 2 m, et présentent des capacités comprises entre 0,45 et 1 m³/s par mètre. Elles équipaient de très nombreux moulins dans les régions de plaine.

Les roues en dessous traditionnelles sont habituellement munies de pales droites qui ne permettent pas de tirer le meilleur parti de l'écoulement ; aussi présentent-elles des rendements faibles, compris entre 20 et 45%.

Au XIX^e siècle, le savant français Poncelet a perfectionné ce principe en adoptant des pales courbes permettant de mieux exploiter l'énergie de l'écoulement. Ces roues atteignent un rendement de 55 à 65%.



Roue en dessous traditionnelle

A ma connaissance, ces machines, tout comme les roues à aubes horizontales évoquées lors de l'introduction, n'ont pas encore attiré l'attention de laboratoires de recherche.

Dans le cadre d'une rénovation, remplacer une roue en dessous vétuste par une roue de côté moderne (roue Fonfrède, Zuppinger,...) compatible avec la hauteur de la chute, permet de tirer le meilleur parti de la ressource hydraulique : du fait du bon rendement de ces roues de côté, l'énergie produite par une chute donnée peut être multipliée par un facteur compris entre 2 et 4.

3. Les vis hydrodynamiques :

Tout comme la roue à aubes, la vis hydrodynamique tire son origine de l'Antiquité. Elle est en effet une adaptation récente de la vis d'Archimède qui fut inventée, dit-on, par l'illustre savant grec pour vider les cales des navires. Tandis que la première reste irremplaçable pour relever les eaux chargées, par exemple dans les stations d'épuration, la vis hydrodynamique constitue un moteur hydraulique parfaitement adapté aux microcentrales hydroélectriques de basse chute.

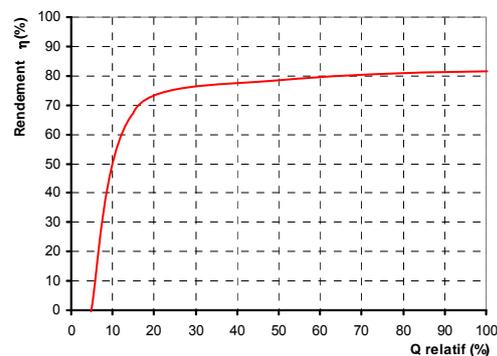
Elle est constituée d'un cylindre, autour duquel s'enroulent en hélice trois bandes métalliques. L'ensemble tourne dans une auge présentant une surface cylindrique.

La vis hydrodynamique, produite par le fabricant de pompes allemand Ritz Atro, est conçue pour des hauteurs de chute comprises entre 1 et 10 m et des débits nominaux de 0,25 à 5 m³/s, ce qui lui permet de couvrir une plage de puissances allant de 3 et 300 kW.



Doc Ritz Atro

Vis hydrodynamique



Courbe de rendement

Elle partage avec la roue à aubes de nombreuses qualités, mais également certains défauts :

Sa constitution est simple et très robuste. Son rendement, de l'ordre de 80 à 85%, reste quasiment constant sur une large plage de débit, allant de 20 à 100% du débit nominal, sans le

moindre réglage. Sa vanne de garde, qui fonctionne en tout ou rien, sert uniquement à couper l'alimentation en eau, lors des phases d'arrêt.

La vis n'est pas sensible aux débris flottants et ne nécessite qu'une grille de protection d'écartement important (10 à 20 cm entre les barreaux), qui se passe aisément de dégrilleur.

Son intégration dans les ouvrages existants ne demande que peu de travaux de génie civil.

Enfin, de sérieuses études ont prouvé qu'en raison de sa faible vitesse de rotation et de son fonctionnement à la pression atmosphérique, la machine ne cause aucun dommage significatif aux poissons qui l'empruntent au cours de leur dévalaison.

Par contre, sa faible vitesse de rotation, de l'ordre d'une trentaine de tours par minute, rend indispensable l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse de rapport élevé.

L'absence de vanne de réglage contrôlant l'écoulement absorbé par la machine peut occasionner, en fonction du débit disponible du cours d'eau, des variations du niveau de la retenue d'eau, dont l'amplitude est susceptible d'atteindre 75% du rayon de la vis. Par faible débit, il en résulte une réduction de la hauteur de la chute, voire un dysfonctionnement de la passe à poissons et de l'échancrure du seuil assurant l'écoulement du débit réservé.

A puissance donnée, son encombrement et sa masse sont relativement importants (tout en restant inférieurs à ceux d'une roue Zuppinger). Enfin, son esthétique peut difficilement rivaliser avec celle des roues à aubes.

4. Quelques compléments d'informations :

- Sur des installations de très basse chute présentant un débit élevé, il est souvent impossible de n'utiliser qu'un seul moteur hydraulique. Plusieurs machines doivent alors être associées.

Cette disposition est techniquement intéressante, car elle permet d'adapter le nombre de machines en service au débit disponible, de manière à optimiser le rendement global de l'installation. De même, il sera possible d'arrêter un groupe pour des opérations de maintenance alors que les autres continuent à produire.

Par contre, le coût de cette solution est habituellement supérieur à celui d'un moteur unique.

- Le moteur hydraulique est l'élément capital d'un aménagement : si la machine existante présente des performances intéressantes et si son état permet d'envisager sa remise en service dans de bonnes conditions après une révision convenable, cette solution sera de loin la plus économique.
- Si le moteur doit être remplacé en raison de son état ou de ses piètres performances, choisir une machine de la même famille que le moteur d'origine (une turbine à la place d'une ancienne turbine, une roue à aubes moderne à la place d'une roue en dessous traditionnelle) permet de minimiser considérablement les travaux d'implantation et par conséquent, de réduire les coûts.

5. Perspectives :

De nombreux laboratoires explorent de nouvelles solutions permettant de valoriser les très basses chutes, qui sont encore peu exploitées mais qui présentent un potentiel hydraulique très important à travers toute l'Europe.

Ainsi, de nouveaux types moteurs hydrauliques destinés aux très basses chutes pourraient apparaître sur le marché au cours des prochaines années. Le Département de Génie Civil de l'Université de Southampton a dressé récemment le panorama des dispositifs faisant l'objet des recherches actuelles¹.

¹ P. WIEMANN, G. MULLER, J SENIOR - Review of current developments in low head, small hydropower - Civil Engineering Department, University of Southampton.

VII. Les multiplicateurs de vitesse :

La vitesse de rotation des moteurs hydrauliques des installations de basse chute est toujours inférieure à celle des génératrices standard, prévues pour être entraînées à 750, 1000 ou 1500 tr/min. Ce problème peut être résolu par les alternatives suivantes :

- Faire réaliser sur mesure une génératrice ayant la même vitesse de rotation que la turbine ou la roue à aubes. Cette solution, qui permet l'entraînement direct de la machine, est courante dans les grandes centrales hydroélectriques (les alternateurs de l'usine marémotrice de la Rance tournent à 93,75 tr/min), mais est peu réaliste à l'échelle d'un moulin : même si un constructeur acceptait de concevoir et de fabriquer une telle génératrice, son coût serait vraisemblablement prohibitif.
- Entraîner une génératrice standard, de grande diffusion et bon marché, par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. Cette solution, rationnelle et économique, est pratiquement toujours retenue. On utilise essentiellement les multiplicateurs à courroie ou à engrenages.

1. Les multiplicateurs à poulies et courroies :

Ce type de transmission est fréquemment associé aux turbines. Il peut également être mis en œuvre sur une roue à aubes ou une vis hydrodynamique, pour assurer la liaison entre la sortie d'un multiplicateur à engrenages et la génératrice.

L'arbre de la turbine et celui de la génératrice sont munis chacun d'une poulie. La transmission du mouvement est assurée par une courroie qui établit le lien entre les deux poulies.

Ces multiplicateurs sont silencieux, économiques, simples à concevoir et à entretenir. Ils laissent par ailleurs une grande liberté dans le positionnement de la génératrice par rapport à la turbine, par exemple pour placer la génératrice au dessus du niveau atteint par l'eau lors des inondations.

L'élasticité de cette transmission lui permet d'amortir les à-coups liés au couplage de la génératrice sur le réseau ou, sur une installation autonome, dus aux variations brutales de la charge électrique.

Par contre, en termes de maintenance, il est indispensable de vérifier périodiquement la tension de la courroie, ainsi que de surveiller son usure et son vieillissement, de manière à pouvoir procéder à son remplacement dès l'apparition des premiers signes de dégradation.

On utilise principalement les types suivants de courroies :

Les courroies plates sont très silencieuses ; elles permettent de grands entraxes entre les poulies et des rapports de transmission élevés (≤ 20). Leur rendement, de l'ordre de 98%, est très bon, comparable à celui des engrenages.

Par contre, les puissances et les couples transmissibles sont limités. Aussi ce type de transmission convient-il difficilement en sortie d'une roue à aubes.

Elles exigent enfin une forte tension qui peut générer des contraintes importantes au niveau des paliers des machines.



Les courroies trapézoïdales, associées à des poulies à gorge, permettent, à tension égale, de transmettre une puissance plus importante que les courroies plates. Pour accroître encore la puissance transmissible, il est possible d'associer plusieurs de ces courroies en parallèle sur une même poulie, qui devra être munie du nombre correspondant de gorges. Cependant, leur rendement, compris entre 70 et 96%, est inférieur à celui des courroies plates, et la plage des rapports de transmission est un peu plus limitée (≤ 16).



La variante des **courroies striées** (Poly-V) présente un comportement qui se rapproche de celui des courroies plates mais, à largeur égale, leur surface de contact avec les poulies est bien supérieure, ce qui autorise des puissances transmissibles et des rapports de transmission élevés (≤ 40).



Les courroies crantées assurent une transmission sans glissement, avec une tension réduite. Mais en raison du coût de l'ensemble poulies courroie, elles sont encore peu utilisées dans les microcentrales.



Doc. Direct Industry

2. Les multiplicateurs à engrenages :

Les multiplicateurs à engrenages sont principalement utilisés en association avec les roues à aubes et les vis hydrodynamiques, qui développent des couples très élevés et qui nécessitent des rapports de multiplication élevés sous un volume réduit.

On appelle engrenage l'ensemble de deux roues dentées s'engrenant l'une avec l'autre.

Les multiplicateurs des microcentrales sont habituellement équipés d'engrenages droits à denture hélicoïdale qui permettent de transmettre des efforts importants à des vitesses élevées, tout en assurant un fonctionnement silencieux et un très bon rendement (98 à 99% par engrenage).

Entre deux roues dentées, le rapport des vitesses est habituellement limité à 8 ; pour obtenir un rapport supérieur, on réalise des « trains d'engrenages » en intercalant des couples de roues (deux roues dentées solidaires du même axe et ayant un nombre de dents différent) entre la roue motrice et la roue réceptrice. Il est ainsi possible d'obtenir des rapports de transmission élevés, mais le rendement du multiplicateur diminue et son coût augmente rapidement avec l'accroissement du nombre d'engrenages.

Les trains sont montés dans un carter qui porte les arbres des roues dentées et assure leur protection contre les éléments extérieurs (poussière, eau,...), ainsi que leur lubrification.



Doc. Wikipedia

Multiplicateur à 3 engrenages hélicoïdaux

Ces multiplicateurs sont des systèmes très résistants, ayant une longue durée de vie. Leur maintenance se limite à une vérification du niveau d'huile dans le carter et à une vidange périodique. Cependant, leur coût peut être élevé.

Les multiplicateurs des microcentrales sont de préférence munis de paliers étanches évitant la pénétration de l'eau et la contamination de l'huile en cas d'inondation. Ils doivent également être conçus pour supporter les contraintes liées au couplage de la génératrice sur le réseau.

Pour obtenir des performances optimales, l'utilisation d'un réducteur inversé est à éviter.

Tableau de synthèse ¹:

	Engrenages (par engrenage)	Courroies crantées	Courroies striées	Courroies trapézoïdales	Courroies plates
Couples et puissances transmissibles	Très élevés	Assez élevés	Modérés	Moyens	Faibles
Vitesses limites (m/s)	80 à 100	60	60 à 80	40	80 à 100
Rapport de transmission	≤ 8	≤ 10	≤ 40	≤ 16	≤ 20
Rendement(%)	98	≤ 98	≤ 98	70 à 96	98
Tension initiale	Inutile	Faible	Assez élevée	Peu élevée	Elevée
Durée de vie	Elevée	Limitée	Limitée	Limitée	Limitée
Lubrification	Nécessaire	Inutile	Inutile	Inutile	Inutile
Inconvénients	Entraxe précis Lubrification	Moins économique	Moins économique	Rendement	Couples limités
Avantages	Grands couples et grande puissance	Entretien réduit	Flexibilité Diamètres d'enroulement faibles	Economique Encombrement réduit Association en parallèle	Gdes vitesses Rendement Silencieuses Rapport élevé

¹ J.L. FANCHON - Guide des Sciences et Technologies Industrielles - Ed. NATHAN.

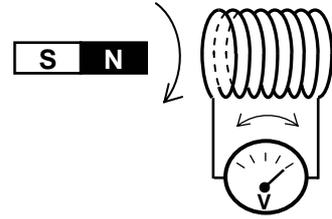
VIII. Les génératrices électriques :

La génératrice d'une centrale hydraulique assure la conversion de l'énergie mécanique de rotation, développée par le moteur hydraulique, en énergie électrique.

Elle comporte : - une partie fixe, le stator ;
- une partie tournante, le rotor.

Toute génératrice exploite le phénomène d'induction magnétique : un circuit électrique, soumis à une variation de champ magnétique ou balayé par un champ magnétique, est le siège d'une tension induite.

Par exemple, un aimant qui tourne devant une bobine induit dans cette dernière une tension alternative.



Les génératrices des centrales hydroélectriques sont habituellement des machines générant des courants alternatifs triphasés*. A puissance donnée, elles sont moins lourdes et moins volumineuses que les génératrices monophasées équivalentes.

On emploie : - les génératrices synchrones, encore appelées alternateurs ;
- les génératrices asynchrones.

1. La génératrice synchrone ou alternateur :

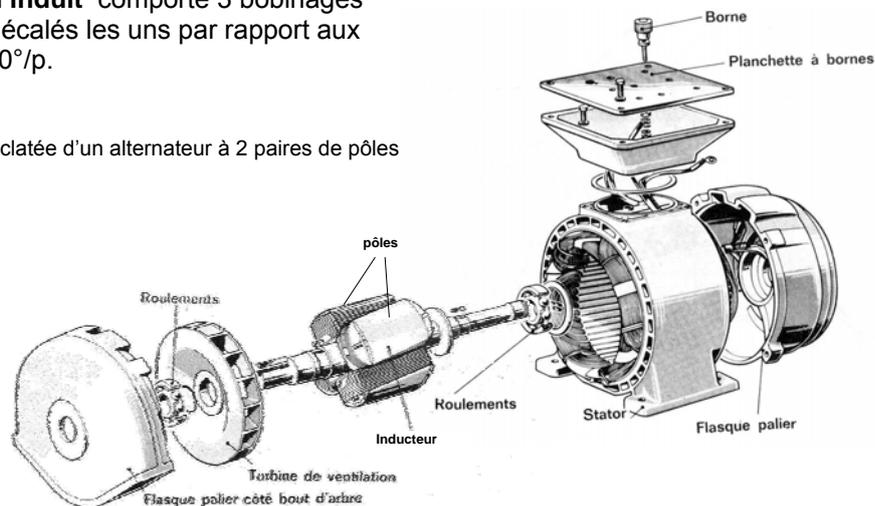
a. Description :

Le rotor ou inducteur produit le champ magnétique indispensable au fonctionnement de la machine. Ce champ est créé soit par un bobinage alimenté en courant continu, soit, plus rarement, par des aimants permanents.

Le rotor porte un nombre pair de pôles magnétiques, dont les polarités Nord et Sud se succèdent. Le nombre p de ces paires de pôles caractérise la machine.

Le stator ou induit comporte 3 bobinages identiques, décalés les uns par rapport aux autres de $120^\circ/p$.

Vue éclatée d'un alternateur à 2 paires de pôles



Doc. Leroy Somer

b. Principe de fonctionnement :

Lorsque le rotor est entraîné par le moteur hydraulique, son champ magnétique balaye successivement les 3 bobinages du stator, qui sont alors le siège de tensions induites alternatives, dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation.

En raison du décalage respectif des 3 bobinages, ces tensions sont déphasées d'un tiers de période (120°) l'une par rapport à l'autre : elles constituent bien un système de tensions alternatives triphasées.

La fréquence f (Hz) des tensions générées par une machine à p paires de pôles, tournant à vitesse n (tr/s) ou N (tr/min) vaut :

$$f = p n = p N / 60$$

Par exemple, pour générer une fréquence de 50 Hz, un alternateur à 2 paires de pôles doit tourner à la vitesse de 1500 tr/min.

L'intensité du courant continu alimentant l'inducteur permet de contrôler la valeur de la tension générée par la machine. Ce courant est habituellement produit par une excitatrice, une génératrice de faible puissance montée en bout d'arbre de l'alternateur.

c. Considérations pratiques :

Les alternateurs standards, de puissance inférieure ou égale à 150 kVA, sont souvent destinés aux groupes électrogènes ; de ce fait, ils sont conçus pour tourner à 1500 ou à 3000 tr/min. Seuls ceux d'une vitesse nominale de 1500 tr/min, à 2 paires de pôles, sont utilisables dans les microcentrales hydroélectriques.

Les alternateurs présentent un très bon rendement, y compris lorsqu'ils sont utilisés en charge partielle. Au point nominal, leur rendement est d'autant meilleur que leur puissance nominale est élevée (voir le tableau, page 43).

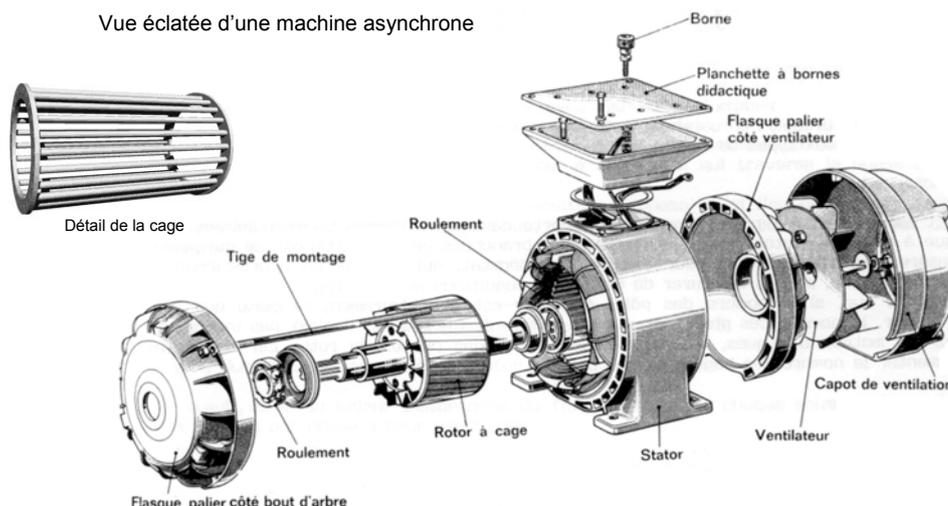
2. La génératrice asynchrone :

a. Description :

Le stator est similaire à celui de l'alternateur ; il comporte 3 bobinages identiques, régulièrement espacés. La réalisation de ces bobinages impose le nombre p de paires de pôles de la machine.

Le rotor porte un ensemble de barres en aluminium ou en cuivre, court-circuitées par deux couronnes conductrices. Cet assemblage présente la forme d'une cage d'écureuil et peut être assimilé à un enroulement triphasé en court circuit.

Ce type de rotor, qui ne comporte aucun bobinage, est particulièrement robuste et économique. Contrairement à celui de l'alternateur, il n'est raccordé à aucune source d'énergie électrique.



Doc. Leroy Somer

b. Principe de fonctionnement :

Lorsque les enroulements statoriques d'une machine asynchrone sont alimentés par des courants alternatifs triphasés, ils génèrent au cœur de celle-ci un champ magnétique présentant la propriété de tourner autour l'axe de la machine à une vitesse proportionnelle à la fréquence d'alimentation ; ce champ est appelé champ magnétique tournant statorique.

Ainsi, le stator d'une machine à p paires de pôles, alimenté par le réseau triphasés de fréquence f (Hz), génère un champ tournant statorique, de vitesse N_s (tr/min), dite **vitesse de synchronisme** :

$$N_s = 60.f/p.$$

- Lorsque le rotor est entraîné à la vitesse de synchronisme N_s , chacun de ses conducteurs « voit » à un champ magnétique constant. Aucun courant n'y est donc induit. La machine ne fonctionne ni en moteur, ni en génératrice.
- Lorsque le rotor est entraîné à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme N_s , ses conducteurs sont balayés par le champ tournant statorique. Ils sont alors le siège de courants induits triphasés qui génèrent à leur tour un champ tournant rotorique. Comme dans le cas de l'alternateur, le champ magnétique engendré par le rotor balaye les bobinages du stator, qui sont, de ce fait, le siège de tensions induites alternatives triphasées. La machine fonctionne en génératrice et peut fournir de l'énergie électrique.
- Si la vitesse du rotor est inférieure à celle du champ tournant, la machine fonctionne en moteur. Cette situation se présente naturellement lorsqu'une machine asynchrone couplée au réseau est abandonnée à elle-même ou entraînée à une vitesse insuffisante. Elle absorbe alors de l'énergie électrique.

c. Remarque importante :

Qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice, la machine asynchrone **absorbe** de l'énergie « réactive »* pour produire le champ magnétique tournant indispensable à son fonctionnement.

- Lorsque la génératrice est couplée au réseau, c'est ce dernier qui lui fournit cette énergie.
- Le fonctionnement autonome de la génératrice est cependant possible, à condition de lui associer une batterie de condensateurs qui lui fournira l'énergie réactive nécessaire. La machine s'amorce, c'est-à-dire se met à générer une tension, grâce à l'aimantation rémanente conservée par ses constituants ferromagnétiques, suite à une utilisation antérieure. Par contre, une charge trop importante provoque la désexcitation et la démagnétisation complète de la machine. En mode autonome, la tension délivrée par la génératrice peut être réglée en ajustant la capacité de cette batterie de condensateurs.

d. Considérations pratiques :

Lors du fonctionnement en génératrice, la vitesse du rotor est supérieure mais proche de la vitesse de synchronisme.

Les génératrices asynchrones standard possèdent entre 1 et 4 paires de pôles. Plus ce nombre est élevé, plus la vitesse de rotation de la machine est basse, mais plus cette génératrice est lourde, volumineuse et...onéreuse.

Le tableau suivant indique, en fonction du nombre p de ses paires de pôles, la vitesse de synchronisme N_s d'une génératrice asynchrone produisant une fréquence de 50 Hz, et, à titre d'exemple, la vitesse de rotation nominale N , la masse m et le facteur de puissance* $\cos \varphi$ d'une machine de 37 kW.

p	N_s (tr/min)	N (tr/min)	m (kg)	$\cos \varphi$
1	3000	3050	200	0,85
2	1500	1530	240	0,82
3	1000	1025	350	0,81
4	750	765	435	0,73

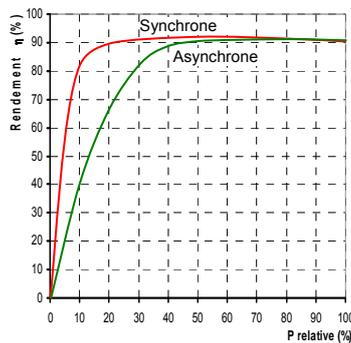
Le nombre de pôles d'une génératrice sera choisi de manière à minimiser le coût et la complexité de l'installation, en particulier ceux de l'ensemble multiplicateur de vitesse – génératrice :

- Comme pour les alternateurs, les génératrices à une paire de pôles sont à proscrire des installations hydroélectriques en raison de leur vitesse de rotation trop élevée.
- Les génératrices à 3 paires de pôles sont les plus utilisées sur ce type d'installation car elles représentent un bon compromis entre une vitesse de rotation modérée qui évite l'emploi d'un multiplicateur de rapport élevé, et une masse, un coût et un facteur de puissance raisonnables.
- Par rapport à la précédente, la génératrice à 4 paires de pôles présente l'avantage évident d'une vitesse de rotation plus basse, mais en plus de sa masse et de son coût plus élevés, son facteur de puissance réduit impose l'usage d'une batterie de condensateurs de capacité plus élevée pour produire l'énergie réactive nécessaire au bon fonctionnement de l'installation.

Tant que la puissance nominale de la machine reste inférieure à quelques dizaines de kW, il est tout à fait envisageable d'employer un moteur asynchrone de série afin de l'utiliser comme génératrice, sans la moindre modification. Cette solution est particulièrement économique et laisse un choix considérable en ce qui concerne le mode de fixation ou l'indice de protection de la machine. Toutefois, le rendement et le facteur de puissance seront légèrement inférieurs aux valeurs indiquées par le constructeur pour le fonctionnement en moteur (voir Fiche 5).

Pour des puissances plus élevées, ou lorsque l'on souhaite optimiser le rendement et le facteur de puissance de l'installation, il est préférable d'employer une machine spécialement conçue pour fonctionner en génératrice.

A puissance donnée, le rendement d'une génératrice asynchrone est légèrement inférieur à celui d'une machine synchrone et il décroît plus rapidement en charge partielle.



Comparaison des courbes de rendement

Puissance nom. (kW)	Rendement nom. (%)
5,5	82
11	87
22	90.5
45	93
110	95

Rendement des génératrices au point nominal.

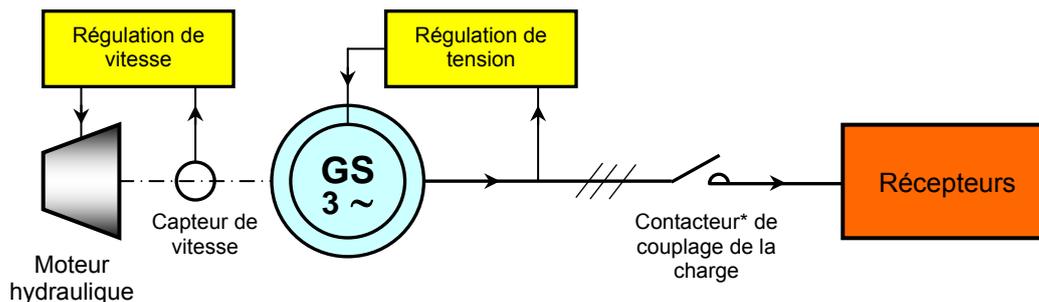
IX. La mise en œuvre des génératrices :

1. Fonctionnement en réseau autonome :

Dans cette configuration, la génératrice fournit l'énergie nécessaire à l'alimentation d'une installation non raccordée au réseau public, tout en assurant une bonne stabilité de la tension et de la fréquence générées, en dépit des variations possibles de la consommation.

a. Génératrice synchrone :

L'alternateur est parfaitement adapté à ce mode de fonctionnement.



- * La tension générée par l'alternateur est contrôlée par un régulateur de tension, généralement incorporé à la machine, qui agit sur le courant inducteur alimentant le rotor.
- * Etant donné que la fréquence générée par l'alternateur est proportionnelle à sa vitesse de rotation, le groupe doit être muni d'un dispositif contrôlant automatiquement sa vitesse. Cette régulation peut agir sur le débit de l'eau dans le moteur hydraulique, selon le schéma ci-dessus. Comme l'action de ce dispositif est souvent lente par rapport aux variations de la consommation, son travail est facilité par une inertie importante du système d'entraînement. A défaut, la vitesse peut être contrôlée en agissant sur la charge de la génératrice. Celle-ci devra alors être associée à une régulation par absorption d'énergie, décrite au paragraphe suivant.

b. Génératrice asynchrone :

La mise en œuvre de la génératrice asynchrone, qui ne possède pas de circuit inducteur, est plus délicate que celle de l'alternateur.

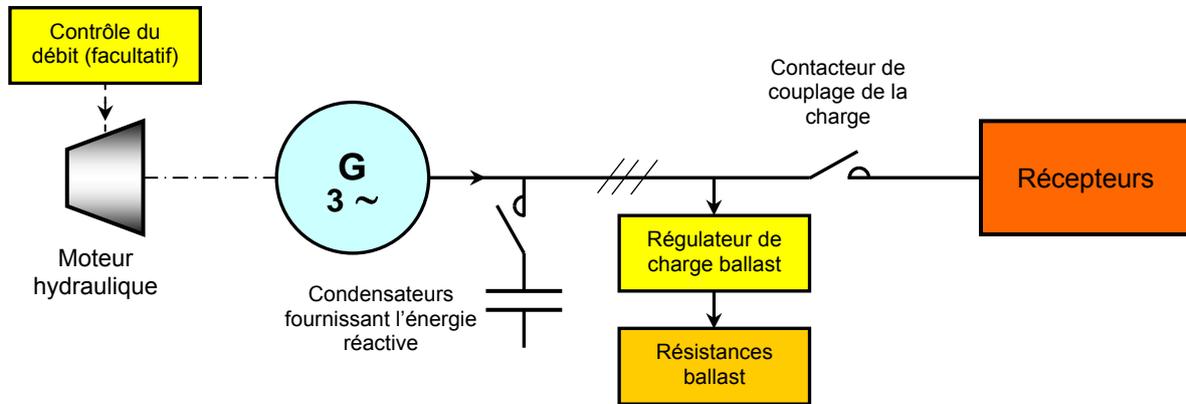
La machine doit obligatoirement être associée à une batterie de condensateurs qui lui fournit l'énergie réactive nécessaire à la production du champ magnétique tournant. Ces condensateurs doivent être couplés à la génératrice avant la mise en service de la charge, afin que la machine puisse s'amorcer, c'est-à-dire établir sa tension.

La génératrice fonctionne de manière satisfaisante si, à tout instant, les égalités suivantes concernant les puissances actives (P) et réactives (Q) sont satisfaites :

$$\begin{aligned} P \text{ absorbée par les récepteurs et les différentes pertes} &= P \text{ fournie par la génératrice.} \\ Q \text{ absorbée par les récepteurs et la génératrice} &= Q \text{ fournie par les condensateurs.} \end{aligned}$$

- * Lorsque la génératrice alimente un circuit de chauffage à résistances, des variations de tension et de fréquence de l'ordre de 20% peuvent être tolérées. De ce fait, une régulation est inutile, d'autant plus que système : moteur hydraulique - génératrice asynchrone - résistances, tend à s'équilibrer naturellement. Seul un délesteur est requis pour adapter la charge aux fortes variations du débit.
- * Lorsque la puissance fournie par le moteur hydraulique ou celle consommée par les récepteurs varient, mais qu'une stabilité raisonnable de la tension et de la fréquence est requise, l'installation doit être munie d'une régulation par absorption d'énergie mettant en œuvre une charge ballast, c'est à dire une charge résistive qui est ajustée automatiquement pour absorber à tout instant la différence entre la puissance produite par la génératrice et celle absorbée par les récepteurs.

Ce principe est applicable, que le moteur hydraulique soit équipé ou non d'un contrôle du débit. Cependant, dans ce dernier cas, la génératrice délivrera en permanence la puissance maximale possible, y compris lorsque la consommation des récepteurs est faible. La puissance excédentaire, dissipée dans les résistances, n'est toutefois pas forcément perdue : elle peut être employée pour le chauffage d'un bâtiment ou la préparation d'eau chaude sanitaire.



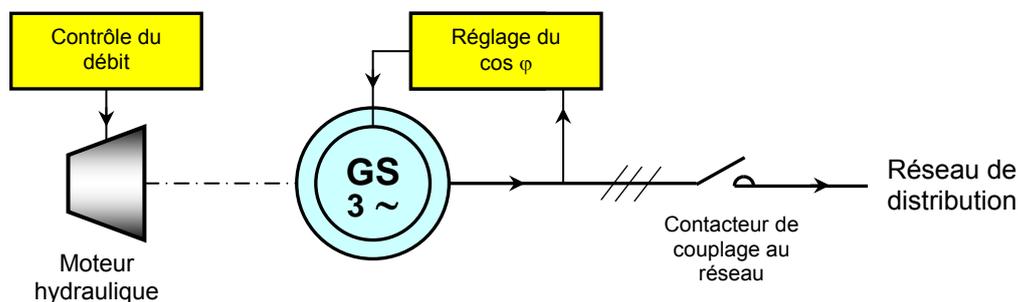
Ce type de régulation donne de bons résultats si les variations de la puissance développée par la turbine sont limitées et si la puissance réactive absorbée par les récepteurs reste constante. Dans le cas contraire, la capacité de la batterie de condensateurs devra être ajustée en fonction des besoins, ce qui complique l'installation et augmente son coût.

2. Fonctionnement en parallèle avec le réseau :

Dans cette configuration, la génératrice injecte l'énergie produite au réseau de distribution Basse Tension. Celui-ci impose sa tension et sa fréquence à la machine. Le couplage de cette dernière sera mené de manière à éviter tout échange brutal d'énergie entre elle et le réseau. La forte inertie mécanique préconisée pour le fonctionnement en réseau autonome est inutile ici et peut même se révéler contre-productive.

a. Génératrice synchrone :

Le moteur hydraulique qui entraîne la génératrice doit être muni d'un dispositif assurant la régulation de sa vitesse de rotation, par l'intermédiaire d'un contrôle du débit. L'alternateur est équipé d'un dispositif contrôlant son courant inducteur.



* Après le démarrage du groupe, les dispositifs de régulation ajustent la fréquence (en contrôlant la vitesse) et la tension (par une action sur le courant inducteur) à des valeurs identiques à celles du réseau. Une fois ces égalités obtenues, l'alternateur est couplé au réseau.

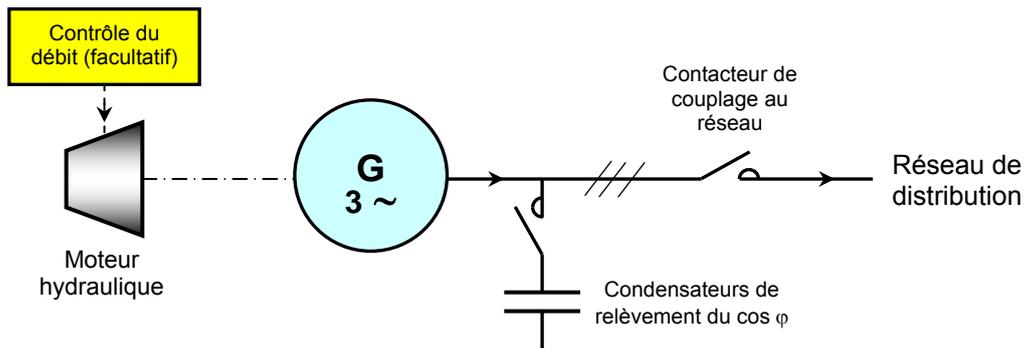
Ces opérations sont contrôlées par un synchro-coupleur ou par l'automate programmable gérant l'installation, en association avec un module spécifique solidaire de l'alternateur.

Une fois le couplage réalisé, la machine tourne à la vitesse imposée par la fréquence du réseau ($N = 60 f/p$) ; on dit qu'elle est « accrochée » sur le réseau.

* L'augmentation du débit dans le moteur hydraulique entraîne l'augmentation de la puissance fournie au réseau. Le facteur de puissance ($\cos \varphi$) est ajusté à sa valeur optimale (≈ 1) par le régulateur contrôlant le courant inducteur de la génératrice.

b. Génératrice asynchrone :

La mise en œuvre de la génératrice asynchrone couplée au réseau est plus simple que celle de la génératrice synchrone. Elle ne nécessite ni régulateur de vitesse, ni régulateur de tension. Le réseau fournit à tout moment l'énergie réactive nécessaire au fonctionnement de la génératrice. Une batterie de condensateurs est cependant indispensable pour améliorer le facteur de puissance ($\cos \varphi$) de l'installation.



* Le groupe est accéléré progressivement. Lorsque la vitesse de la génératrice est proche de la vitesse de synchronisme, la machine est couplée sur le réseau par la simple fermeture d'un contacteur.

L'ordre de couplage est habituellement donné par un détecteur tachymétrique à seuil, associé à l'arbre de la génératrice. Ce même dispositif peut également signaler l'emballement du groupe, en cas de coupure accidentelle du réseau.

Remarque : au moment du couplage, la machine absorbe une pointe de courant brève mais intense. Son effet est négligeable sur les installations de petite et de moyenne puissance, mais au-delà de 100 kW, il est préférable de réduire son intensité à l'aide de résistances insérées dans le circuit au moment du couplage.

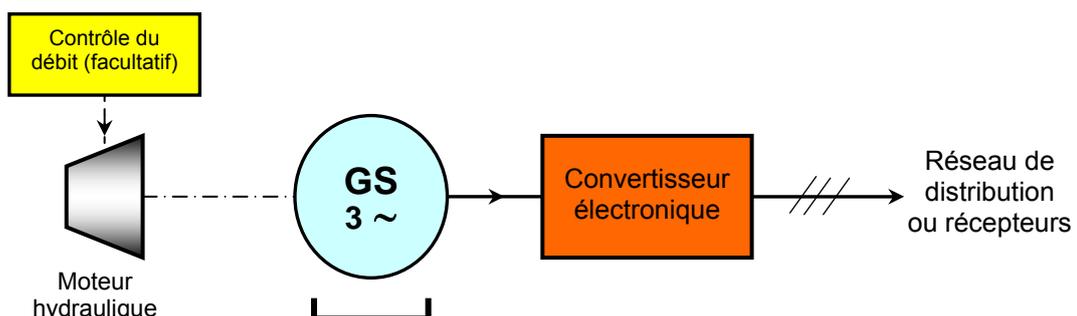
* Une fois la génératrice couplée au réseau, la batterie de condensateurs est mise en service.

* L'augmentation du débit de l'eau dans le moteur hydraulique entraîne l'augmentation de la puissance fournie par la génératrice au réseau.

Aucune régulation de vitesse n'est nécessaire : toute variation de la vitesse de la génératrice est auto-compensée par la forte variation du couple résistant qui en résulte.

3. Cas particulier des alternateurs à aimants permanents

Les alternateurs à aimants permanents peuvent être munis d'un nombre de pôles très élevé, ce qui autorise de basses vitesses de rotation et permet de se passer de multiplicateur de vitesse.



Ces machines ne disposent cependant d'aucune possibilité de réglage de la tension de sortie. De ce fait, elles sont couplées **indirectement** aux récepteurs ou au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique délivrant les tensions et la fréquence adéquates.

Ce système permet de faire varier la vitesse du moteur hydraulique en fonction des conditions de l'écoulement, afin de maximiser la production de l'installation, tout en alimentant les récepteurs sous une tension et une fréquence constantes.

Son utilisation est intéressante sur les sites subissant d'importantes variations de la hauteur de chute.

Toutefois, en raison de sa complexité et de son coût, ce système, couramment employé sur les éoliennes, est encore peu utilisé sur les microcentrales hydroélectriques

4. Synthèse :

a. Fonctionnement en parallèle avec le réseau :

Dans le domaine des puissances inférieures à 150 kW qui font l'objet de cette étude, la génératrice asynchrone présente de nombreux avantages décisifs sur l'alternateur :

- sa constitution est simple et robuste : le rotor ne comporte aucun bobinage ; il supporte bien l'emballement en cas de coupure accidentelle du réseau ou de la charge.
- les gammes standard sont très larges et laissent un grand choix en ce qui concerne les vitesses, les possibilités de montage, l'indice de protection,...
- sa mise en œuvre est simple, le couplage sur le réseau est aisé et ne nécessite aucun appareillage complexe.
- Le coût global de l'installation reste acceptable en raison du prix raisonnable de la génératrice et de l'absence d'équipements complexes.

b. Fonctionnement en réseau autonome :

- Pour l'alimentation des installations de chauffage pouvant tolérer des variations de tension et de fréquence, la génératrice asynchrone reste très intéressante pour les raisons évoquées ci dessus.
- Lorsqu'une installation exige une bonne stabilité de la tension et de la fréquence, ou alimente un certain nombre de moteurs électriques (cas d'un petit atelier, par exemple), l'alternateur, qui permet un contrôle simple et efficace de la tension, et qui est capable de fournir l'énergie réactive demandée par les récepteurs, s'impose.

5. Les équipements associés :

Comme toute installation électrique, une installation de production doit garantir la sécurité des biens et des personnes, selon la norme NFC 15-100. Elle doit par conséquent être munie des appareils assurant la protection des personnes, de la génératrice et des circuits alimentés par cette dernière.

a) Les fonctions de l'appareillage associé aux génératrices :

* **Sectionnement** :

L'installation sera munie de l'appareillage (sectionneur, disjoncteur-sectionneur,...) assurant la séparation de la génératrice du reste de l'installation ou du disjoncteur de branchement au réseau, afin de garantir la sécurité des personnes devant intervenir sur ces circuits en vue d'opérations d'entretien ou de réparations.

* **Protection de la génératrice** :

Une génératrice doit être protégée contre les surintensités, telles que les surcharges prolongées et les courts-circuits, au moyen de l'appareillage conventionnel (disjoncteur magnéto-thermique, relais, sondes thermiques logées dans l'enroulement de la génératrice,...)

*** Appareils de mesure :**

Il est recommandé d'équiper l'installation d'appareils de mesure assurant l'affichage des valeurs de ses grandeurs les plus représentatives, telles que les tensions, les intensités, la fréquence, la puissance et l'énergie fournies.

Une **centrale de mesure**, qui permet l'affichage de ces différentes grandeurs et la transmission de leurs valeurs à l'automate gérant la station, est parfaitement adaptée à cette fonction.

b) Les fonctions particulières associées aux installations autonomes

Afin d'éviter d'endommager les récepteurs lors d'une défaillance des dispositifs qui assurent la régulation de la tension ou de la fréquence de la génératrice, l'installation doit être équipée de relais contrôlant ces grandeurs. Dès que les valeurs surveillées sortent des tolérances imposées, ces appareils commandent l'ouverture du dispositif (contacteur, disjoncteur,...) qui assure la déconnexion des récepteurs, et annulent la tension produite par la génératrice.

c) Les fonctions particulières associées aux installations couplées au réseau public :

*** Protection contre la marche en moteur :**

Lorsque le débit disponible du cours d'eau devient insuffisant pour imposer une vitesse de rotation satisfaisante au groupe, la génératrice couplée au réseau se met à fonctionner en moteur, et par conséquent, à absorber de l'énergie électrique. Afin d'éviter ce fonctionnement indésirable, l'installation peut être équipée d'un dispositif qui surveille en permanence la puissance échangée entre le réseau et la génératrice, et qui déconnecte cette dernière dès qu'elle absorbe de la puissance. Ce rôle pourra être joué par un relais wattmétrique ou par la centrale de mesure, si elle est associée à un relais approprié. Dans le cas d'une génératrice asynchrone, qui fonctionne en moteur lorsque sa vitesse de rotation devient inférieure à la valeur de synchronisme, cette fonction peut également être assurée par un détecteur tachymétrique.

*** Découplage :**

Toute installation de production couplée au réseau public de distribution doit être équipée d'un dispositif qui assure automatiquement sa déconnexion en cas de défaut sur ce réseau ou de déclenchement d'un appareil de protection de celui-ci, et qui n'autorise sa reconnexion qu'après le retour aux conditions normales de fonctionnement.

Ce dispositif de découplage évite :

- de maintenir sous tension un ouvrage en défaut du réseau public, ou d'alimenter un défaut de ce réseau ;
- d'alimenter les autres usagers sous une tension ou une fréquence anormales ;
- de maintenir sous tension l'installation intérieure, après sa séparation du réseau public ;
- de perturber le fonctionnement des protections installées sur le réseau public.

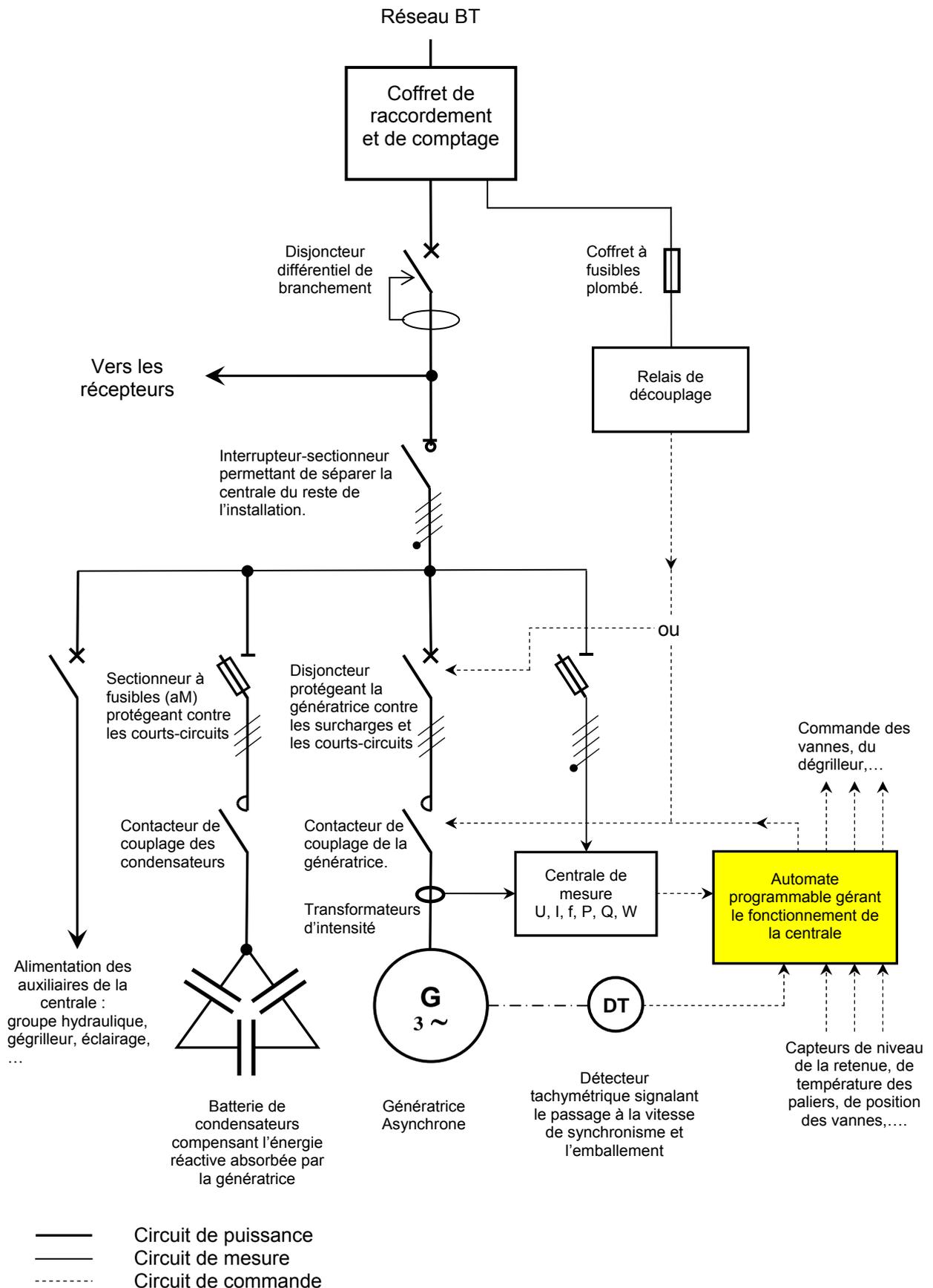
Cette fonction est assurée par un **relais de découplage** qui surveille la tension et la fréquence du réseau. Il déclenche automatiquement l'ouverture de l'**appareil de découplage**, le dispositif (disjoncteur, contacteur) qui assure la séparation de l'installation d'avec le réseau, dès que les valeurs mesurées sortent des tolérances imposées par le service assurant la gestion du réseau de distribution.

Les différents types de relais de découplage et leurs plages de fonctionnement sont décrits dans la Fiche 6.

d) Remarque importante :

En cas de coupure du secteur ou de déconnexion de sa charge, la génératrice ne freine plus le moteur hydraulique, qui part en survitesse. Le groupe doit donc être muni d'un dispositif capable de détecter ce départ en survitesse et de couper automatiquement l'alimentation du moteur, par exemple en fermant sa vanne de garde ou en désamorçant son siphon.

Exemple de schéma de branchement d'une génératrice asynchrone couplée au réseau



X. Automatisme et conduite de la centrale :

Afin de minimiser les coûts d'exploitation, une microcentrale hydroélectrique moderne fonctionnera de manière automatique, sans surveillance humaine.

Son pilotage devra donc être assuré par un dispositif simple et fiable, capable :

- d'adapter le fonctionnement de l'installation à l'évolution normale des conditions d'exploitation, telles que les variations du débit du cours d'eau ou de la consommation de l'énergie produite ;
- de commander la mise en sécurité ou à l'arrêt de la centrale lors de l'apparition de conditions anormales, telles qu'une coupure accidentelle du réseau, ou en cas de dysfonctionnements graves, tels que l'échauffement d'un palier de la turbine ou la défaillance d'un organe de mesure essentiel.

Ce rôle sera joué par un automate programmable industriel.

L'automate sera souvent associé à un dispositif de supervision permettant :

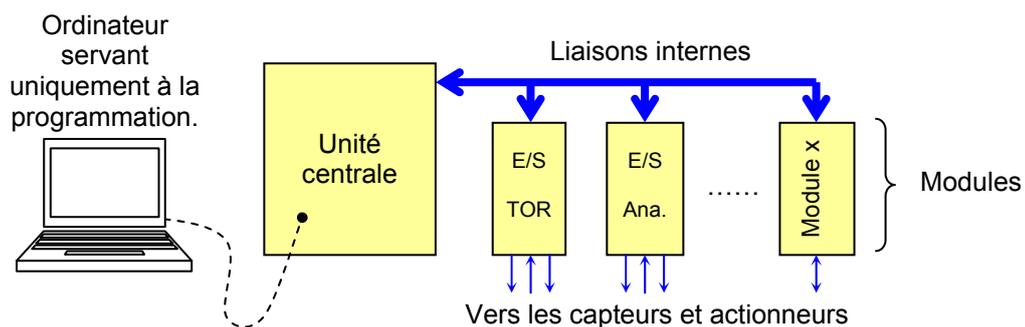
- la surveillance à distance de l'installation, afin d'assurer le suivi de la production et des conditions de fonctionnement de la centrale. Cette télésurveillance permettra également d'effectuer un diagnostic en cas de dysfonctionnement, voire de commander à distance la mise en route ou à l'arrêt de la centrale ;
- le stockage des informations importantes, telles que la puissance et l'énergie produites, la survenue des alarmes,... afin de pouvoir optimiser, par leur analyse ultérieure, le fonctionnement et la maintenance de la centrale.

1. L'automate programmable :

Un automate programmable industriel (API) est un dispositif électronique programmable destiné à la commande de procédés industriels.

Il délivre des ordres (ouverture ou fermeture d'une vanne, d'un contacteur, mise en route du dégrilleur,...) en fonction des informations fournies par des capteurs (mesure du niveau d'eau de la retenue, vanne de garde ouverte,...) et de données mémorisées (niveau d'eau minimum, heure de mise en service,...), d'après les instructions d'un programme informatique.

Un API est organisé autour d'une **unité centrale**, comparable au « cœur » d'un micro-ordinateur. Elle est constituée d'un processeur chargé d'exécuter les instructions du programme, et d'une mémoire où sont stockés le programme et les différentes informations traitées par l'appareil.



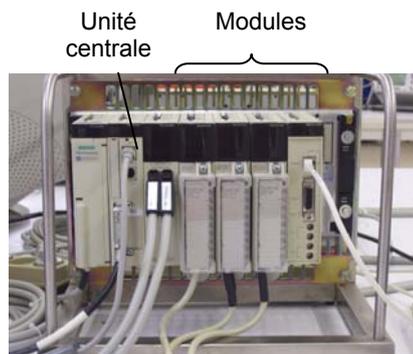
En fonction des besoins, différents modules peuvent être raccordés à l'unité centrale :

- des modules d'entrées tout ou rien (TOR), permettant de « lire » l'état logique (ouvert/fermé) de dispositifs simples (vanne de garde, disjoncteur,...).
- des modules de sorties tout ou rien (TOR), destinés à commander, par l'intermédiaire de pré-actionneurs (contacteurs, électrovannes,...), des dispositifs ne possédant que deux états de fonctionnement (marche/arrêt du moteur du groupe hydraulique commandant le dégrilleur,....)
- des modules d'entrées analogiques, permettant la mesure, par l'intermédiaire des capteurs appropriés, de grandeurs analogiques (niveau d'eau, températures,...)

- des modules de sorties analogiques, destinés à commander les dispositifs dont le comportement est une fonction de la commande (ouverture du distributeur d'une turbine Francis,...).
- des modules de communication assurant l'échange d'informations avec d'autres appareils, tels qu'une centrale de mesure, des capteurs ou des actionneurs « intelligents »,...
- des modules dédiés métiers, tels que des coupleurs de régulation, de comptage rapide,...

Bien entendu, il existe des modules combinant à la fois des entrées et des sorties.

Les automates peuvent également être connectés à des terminaux de dialogue permettant d'afficher des informations relatives au fonctionnement de la centrale, et de saisir des commandes (passage en mode de fonctionnement manuel, arrêt, redémarrage, ouverture des vannes,....).



Automate programmable



Exemple de terminal de dialogue

Leur programme est élaboré sur un ordinateur, à l'aide d'un logiciel dédié à cette fonction, puis transféré dans la mémoire de l'automate. Cet ordinateur ne sert que lors de la programmation et des opérations de maintenance ; il est inutile durant l'exploitation normale du système.

Les langages de programmation existants sont spécialement conçus pour assurer une programmation facile et rapide des applications. On peut citer le langage Grafset, très populaire en France, le langage à contacts (Ladder),.....

Avantages et inconvénients :

Les API sont prévus pour fonctionner dans des environnements hostiles (variations de température, perturbations électromagnétiques, vibrations,...) et leur fiabilité est nettement supérieure à celle des systèmes de bureautique.

Du fait de sa constitution modulaire, un automate est assemblé en fonction des besoins réels du site auquel il est destiné : il ne sera muni que des seuls modules nécessaires au fonctionnement de la centrale. Par ailleurs, la maintenance de l'appareil s'en trouve considérablement simplifiée : un module défectueux peut être très facilement localisé et remplacé.

Comme c'est le programme de l'automate qui définit le fonctionnement de l'installation, il est aisé d'adapter parfaitement ce dernier aux exigences du producteur ainsi qu'aux particularités d'un site. Cette programmabilité facilite également les réglages, la recherche des pannes et permettra d'adapter aisément le traitement à toute évolution ultérieure de l'installation.

Par contre, le coût d'un automate est supérieur à celui d'un micro-ordinateur. Un API muni des modules nécessaires au pilotage d'une microcentrale revient environ à 3 000 €, sans compter la programmation. Celle-ci nécessite par ailleurs l'acquisition d'un logiciel dédié et la maîtrise des langages de programmation spécifiques.

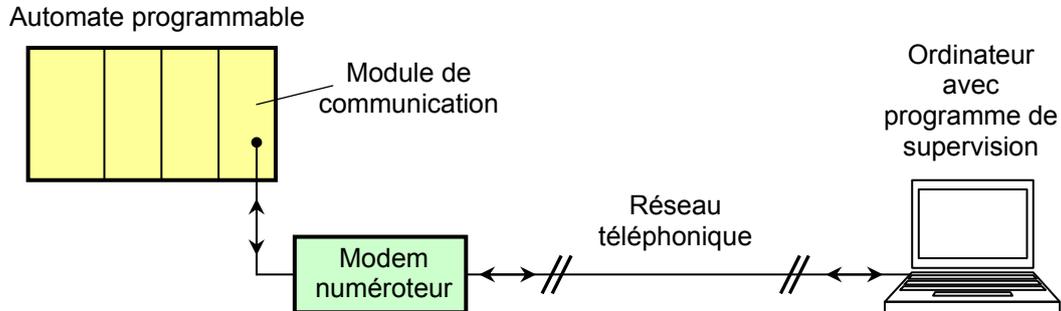
2. Les dispositifs de télésurveillance :

a. Télésurveillance par l'intermédiaire d'un programme de supervision :

L'automate programmable est muni d'un module de communication raccordé au réseau téléphonique par l'intermédiaire d'un modem.

L'ordinateur, à partir duquel s'effectue la télésurveillance, est lui aussi raccordé au réseau téléphonique par sa carte modem. Il met en œuvre l'application d'un programme de supervision, développée dans le but de surveiller le fonctionnement de la microcentrale.

Ce programme permet d'afficher sur des écrans graphiques toutes les informations et les alarmes provenant de la centrale, et d'archiver les données relatives au fonctionnement de l'installation.



Avantages et inconvénients :

Cette solution est simple et économique. Au niveau de la centrale, elle ne nécessite que l'abonnement au réseau téléphonique, ainsi que l'acquisition d'un module de communication et d'un modem.

L'ordinateur peut mettre en œuvre une application développée au moyen d'une version d'évaluation, disponible gratuitement, d'un logiciel de supervision industriel (Panorama,...).

En contrepartie, la télésurveillance ne sera possible qu'à partir d'un ordinateur muni de cette application. Il sera donc impossible d'accéder à l'automate à partir d'un poste quelconque.

Remarque :

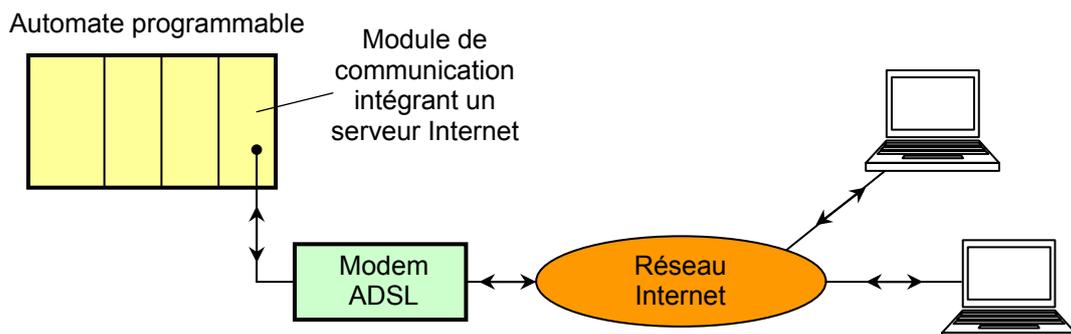
Si le site est occupé en permanence, comme dans le cas d'un ancien moulin servant d'habitation, la surveillance à distance n'est pas nécessaire. Il sera cependant intéressant de bénéficier des différents avantages de la supervision, tels que la centralisation, l'affichage et l'archivage de toutes les informations relatives au fonctionnement de la centrale.

L'ordinateur mettant en œuvre le programme de supervision sera alors directement raccordé à la liaison numérique de l'unité centrale de l'automate. Cette solution ne requiert donc ni module de communication ni raccordement au réseau téléphonique.

b. Télésurveillance par un module intégrant un serveur Internet :

L'automate programmable est muni d'un module de communication intégrant un serveur Internet ; il est raccordé au réseau téléphonique par l'intermédiaire d'un modem ADSL.

Les pages Web de ce module sont créées à l'aide d'un logiciel dédié, fourni par le fabricant du module. Elles rendent compte en temps réel de l'état de l'installation, et permettent de visualiser les alarmes.



Tout ordinateur raccordé au réseau et disposant du mot de passe nécessaire peut accéder, par l'intermédiaire de son navigateur Internet, aux pages Web ainsi créées.

Avantages et inconvénients :

Cette solution permet de consulter les pages Web de la centrale à partir de tout ordinateur ayant accès au réseau. L'exploitant d'une microcentrale, en vacances à l'étranger, pourra ainsi suivre jour après jour le fonctionnement de son installation à partir d'un cybercafé !

Cependant, cette solution est plus onéreuse que la précédente : le module de communication nécessaire est cher et l'abonnement Internet obligatoire. Par ailleurs, cette solution n'offre pas l'étendue des possibilités (archivage,....) d'un programme de supervision.

3. La conduite de l'installation :

L'automate programmable assure, en fonction des conditions externes (présence de la tension du réseau, débit disponible,...), la mise en route de la centrale, le couplage de la génératrice au réseau, la mise à l'arrêt de l'installation,....

Il commande également les différents auxiliaires ; par exemple, il pourra gérer le fonctionnement du dégrilleur et déclencher le nettoyage de la grille, soit à intervalles réguliers, soit en cas de colmatage.

En particulier, l'automate contrôlera le débit absorbé par le moteur hydraulique, si cette fonction est effectivement mise en œuvre :

a. Installation autonome :

Les récepteurs doivent être alimentés à fréquence constante. Pour atteindre cet objectif, l'automate ajuste l'admission du moteur hydraulique de manière à maintenir constante la vitesse de la génératrice, en dépit des variations de la charge.

Par contre, la tension délivrée par la génératrice est contrôlée par un régulateur incorporé à cette machine.

b. Installation fonctionnant en parallèle avec le réseau :

La fréquence du réseau impose la vitesse de rotation de la génératrice, donc celle du moteur hydraulique.

Un contrôle du débit de ce dernier est cependant utile, étant donné qu'au cours d'une année, deux cas de figure peuvent se présenter successivement :

- Lorsque le débit disponible du cours d'eau est supérieur au débit d'équipement de la centrale, le moteur hydraulique absorbe son débit maximal ; la génératrice fonctionne alors à pleine puissance. Le surplus du débit est déversé du seuil, en plus du débit réservé.
Par hautes eaux, l'automate peut également commander l'ouverture des vannes de décharge du barrage pour limiter l'élévation du niveau de la retenue.
- Lorsque de débit disponible est inférieur au débit d'équipement de la centrale, l'automate réduit l'admission du moteur hydraulique de manière à maintenir constant le niveau de la retenue d'eau. L'installation fonctionne de ce fait à puissance réduite.
Lorsque le débit disponible devient inférieur au minimum exploitable par le moteur hydraulique, la centrale est mise à l'arrêt.

c. Cas de la coupure accidentelle de la charge ou du réseau :

Dans cette situation, la génératrice ne freine plus le moteur hydraulique, qui accélère et monte en survitesse. L'automate commande alors la fermeture immédiate de la vanne de garde ou de la vanne d'admission du moteur pour éviter l'emballement de ce dernier. Après le retour aux conditions normales, l'installation peut être redémarrée.

Si l'automate doit continuer à fonctionner lors d'une coupure du secteur, il est indispensable d'assurer son alimentation de secours à partir d'une batterie d'accumulateurs.

XI. Le raccordement au réseau de distribution :

Le raccordement d'une installation de production au réseau électrique, en particulier en vue de la vente de l'électricité, nécessite des démarches dont la relative complexité s'explique par le contexte actuel du marché de l'énergie.

En effet, dans le cadre de l'ouverture du marché de l'énergie à la concurrence, la loi impose une séparation entre les activités d'acheminement et les activités de production ou de commercialisation de l'énergie électrique.

- L'acheminement de l'énergie électrique est confié aux **gestionnaires de réseaux**, qui sont chargés de l'exploitation, de l'entretien et du développement du réseau public d'électricité ; cette activité reste un monopole et n'est donc pas soumise à la concurrence.
 - Les réseaux de haute et de très haute tension, qui transportent l'énergie au niveau national ou régional des centrales de production vers les centres de transformation, sont confiés au **gestionnaire du réseau de transport** : Réseaux de Transport de l'Energie (RTE).
 - Les réseaux de distribution de moyenne et de basse tension, qui acheminent l'énergie des centres de transformation jusqu'aux consommateurs, sont confiés aux **gestionnaires de réseaux de distribution** (GRD), tels qu'EDF Réseaux de Distribution (ERD) ou ses régies locales (Electricité de Strasbourg,...).
- La production et la commercialisation de l'énergie électrique sont ouvertes à la concurrence ; les fournisseurs assurent la vente de l'énergie et les services associés auprès des clients.
Ceux-ci peuvent choisir :
 - de conserver leur contrat avec le fournisseur EDF ou les entreprises locales de distribution, au tarif réglementé fixé par les pouvoirs publics ;
 - de négocier un contrat de vente avec le fournisseur de leur choix.
- Les producteurs peuvent obtenir le raccordement de leur installation au réseau public de distribution :
 - afin de vendre la totalité ou une partie de l'énergie produite par leur centrale ;
 - pour bénéficier des points forts du réseau, tout en consommant l'intégralité de l'énergie qu'ils produisent.

1. Raccordement au réseau en vue de la vente de l'électricité :

Pour vendre l'énergie produite par sa microcentrale hydroélectrique, le futur producteur doit effectuer les trois démarches suivantes :

- 1 : Déclarer son installation à la Direction de la Demande et des Marchés Energétiques (DIDEME).
- 2 : Obtenir le raccordement de son installation au réseau public, auprès du gestionnaire du réseau de distribution desservant sa zone géographique.
- 3 : Conclure un contrat d'achat de l'énergie produite :
 - soit avec le fournisseur EDF ou l'entreprise locale de distribution, dans le cadre de l'obligation d'achat ;
 - soit avec un fournisseur du marché, dans le cadre du droit privé.

1-1. La Déclaration d'exploiter :

Comme toute installation de production d'électricité, les microcentrales hydroélectriques doivent être déclarées à la DIDEME pour bénéficier du droit de vendre l'énergie produite.

Le récépissé de cette déclaration est indispensable pour obtenir le raccordement de l'installation au réseau public de distribution, ainsi que pour bénéficier de l'obligation d'achat de l'énergie produite.

1-2. Le raccordement au réseau public de distribution :

1-2-1. Les schémas de raccordement :

Les installations de production, d'une puissance inférieure à 250 kVA, sont raccordées au réseau de distribution basse tension (BT) 230V/400V - 50 Hz.

Le producteur peut choisir l'une des deux options suivantes :

- vendre la totalité de l'énergie produite ;
- vendre les excédents de la production, c'est-à-dire la différence entre la production et la consommation de son site.

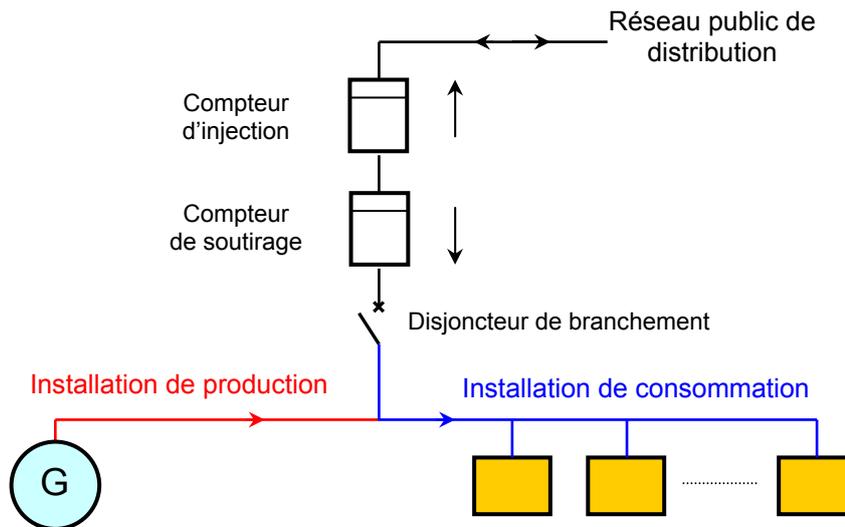
A chaque option correspond un schéma de raccordement particulier :

a. La vente des excédents de la production :

L'installation de production est connectée en interne à l'installation dite de consommation, qui assure l'alimentation des récepteurs du site. Elle est donc raccordée au réseau par l'intermédiaire du branchement existant.

Le producteur consomme une partie de sa production et injecte ses excédents sur le réseau.

Lorsque la production est supérieure à la consommation, la différence « production - consommation » est injectée sur le réseau. Par contre, lorsque la consommation est supérieure à la production, la différence « consommation - production » est soutirée du réseau.



L'installation est équipée de deux compteurs électroniques montés en tête-bêche :

- un compteur totalisant l'énergie soutirée, vendue par le fournisseur au client/producteur ;
- un compteur totalisant l'énergie injectée sur le réseau, achetée par le fournisseur au client/producteur.

Ces appareils ne prennent en compte qu'un sens de transit de l'énergie.

L'utilisation d'un compteur électromécanique réversible, qui compte l'énergie absorbée et décompte l'énergie injectée, est exclue, étant donné que :

- les tarifs d'achat et de vente peuvent être différents ;
- la contribution au service public d'électricité (CSPE), les taxes locales et la TVA sont prélevées sur la consommation ;
- si, entre deux relevés du compteur, la production était supérieure à la consommation, une erreur de relevé serait générée.

Avantages :

Comme l'installation de production est raccordée au réseau par l'intermédiaire du branchement existant, ce raccordement est peu coûteux.

Le raccordement de l'installation de production à une installation existante est considérée comme une extension de cette dernière et ne nécessite donc pas la visite (payante) du Consuel* chargé de vérifier la conformité de l'installation à la norme en vigueur (NF C 15-100).

Inconvénients :

La puissance des excédents livrés au réseau doit rester inférieure à la puissance souscrite par le client de par le contrat de fourniture, sous peine de provoquer le déclenchement du disjoncteur de branchement monté en tête de l'installation.

Par exemple, un client qui a souscrit auprès de son fournisseur un contrat de fourniture de 9 kVA et qui dispose d'une installation de production de 12 kVA, ne pourra pas injecter sur le réseau une puissance supérieure à 9 kVA. Si la production est importante (ex : 12 kVA) et la consommation faible (ex : 2 kVA), la puissance injectée au réseau (10 kVA) dépasse la valeur souscrite, ce qui entraîne l'ouverture du disjoncteur de branchement !

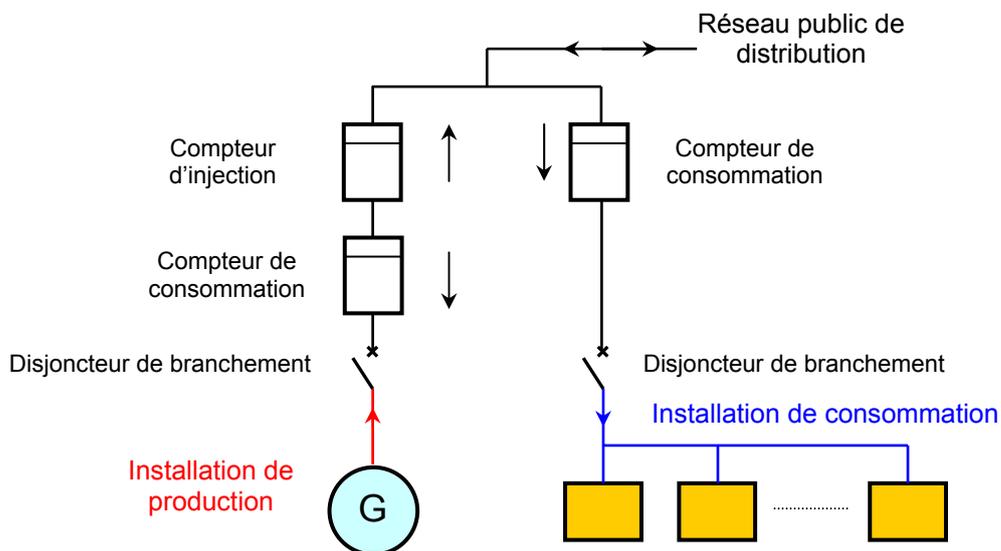
Si le tarif d'achat de l'énergie par le fournisseur est supérieur au tarif de vente, ce qui peut être le cas dans le cadre de l'obligation d'achat de l'électricité d'origine renouvelable, ce mode de raccordement ne permet pas de valoriser au mieux la production.

Remarque : ce mode de raccordement est économiquement avantageux lorsque le tarif d'achat HT de l'énergie par le fournisseur est inférieur au tarif de vente TTC.

b. La vente de la totalité de la production :

L'installation de production est raccordée au réseau par l'intermédiaire d'un point de livraison distinct de celui qui dessert l'installation de consommation.

La totalité de l'énergie électrique produite par la centrale est injectée sur le réseau.



Le branchement comporte donc 2 parties distinctes, le branchement « production » et le branchement « consommation »

Le branchement « production » comporte 2 compteurs électroniques tête bêche :

- un compteur totalisant l'énergie injectée sur le réseau, achetée par le fournisseur.
- un compteur totalisant l'énergie éventuellement consommée par les auxiliaires de l'installation de production (automate programmable, centrale oléo-hydraulique,...). Ce compteur est avant

tout destiné à vérifier que cette consommation reste inférieure à un certain seuil (habituellement 3% de l'énergie produite). Si une consommation supérieure à ce seuil était mise en évidence, le fournisseur demanderait au producteur la souscription d'un contrat de consommation.

Le branchement « consommation » du site, qui alimente les différents récepteurs, ne subit aucune modification et conserve son compteur totalisant la consommation de l'installation.

Avantages :

La puissance injectée sur le réseau n'est pas limitée à la valeur souscrite par le contrat de fourniture du branchement « consommation ». Par exemple, le producteur peut fort bien souscrire un contrat de fourniture de 6 kVA et un contrat de production de 60 kVA.

Par ailleurs, si le site est uniquement destiné à la production d'énergie, le branchement « consommation » est superflu.

Si le tarif d'achat HT de l'énergie est supérieur au tarif de vente TTC, ce schéma permet de valoriser au mieux l'énergie produite.

Inconvénients :

Ce type de raccordement coûte plus cher que l'option précédente.

L'ajout d'un branchement « production » est assimilable à une nouvelle installation. De ce fait, son raccordement au réseau public est subordonné à l'obtention d'un certificat Consuel*.

Remarque : Ce mode de raccordement est fréquemment utilisé sur les installations de production utilisant les énergies renouvelables, car il permet souvent (notamment dans le cas d'une installation photovoltaïque) de mieux valoriser financièrement l'énergie produite.

Remarque importante :

D'un point de vue énergétique, ces deux solutions sont équivalentes, l'électricité étant toujours consommée au plus près de son lieu de production. Leur différence porte uniquement sur la valorisation financière de l'énergie produite.

1-2-2. Les démarches : (Le détail des démarches est expliqué dans la Fiche 7)

Le raccordement d'une installation de production au réseau implique diverses démarches. Les coûts du raccordement sont à la charge du producteur.

* Le futur producteur effectue une **Demande de raccordement** auprès de son gestionnaire de réseau de distribution (GRD).

Le GRD étudie alors l'impact de l'installation de production sur le réseau et évalue le coût du raccordement. A l'issue de cette étude, qui est gratuite, il transmet au futur producteur une **Proposition Technique et financière** (PTF) qui indique le coût et les délais de l'opération.

Dans le cas d'un projet de puissance supérieure à 36 kVA, dont seules les grandes lignes sont définies, le futur producteur peut faire précéder cette demande par une **Etude de faisabilité**, facultative.

* Une fois la PTF acceptée par le futur producteur, le GRD élabore les documents d'accès au réseau :

- **la convention de raccordement**, qui décrit les ouvrages de raccordement et fixe le coût et les délais de l'opération.
- **la convention d'exploitation**, qui définit les relations entre le producteur et le GRD, en particulier les limites de propriété et de responsabilité respectives, ainsi que leurs relations en régime de fonctionnement normal ou perturbé.
- **le contrat d'accès au réseau**, qui définit les conditions techniques, juridiques et financières du raccordement de l'installation au réseau public, notamment les dispositions relatives au comptage de l'énergie et aux redevances associées, la qualité du réseau et de l'énergie injectée, les clauses de responsabilité, de paiement et d'indemnisation, les conditions d'interruption, de suspension et de résiliation de l'accès au réseau.

Pour les installations de puissance inférieure ou égale à 36 kVA, ces 3 documents sont réunis en un unique **Contrat de raccordement, d'accès et d'exploitation** (CRAE).

- * Après la signature des documents décrits ci-dessus et le versement d'un acompte par le futur producteur, le GRD effectue les travaux de raccordement, puis procède à la **mise sous tension** de l'installation, à condition que cette dernière soit conforme aux normes et dispositions réglementaires en vigueur, et que producteur ait réalisé les travaux qui sont à sa charge.
- * A l'issue de cette opération, le futur producteur peut procéder aux essais et à la mise au point de son installation.

Remarques :

- Le producteur doit souscrire une **Assurance responsabilité civile** couvrant tous les dommages corporels, matériels et immatériels susceptibles de survenir au cours du fonctionnement de l'installation de production.
- Etant donné que le réseau électrique ne dispose d'aucune capacité à stocker l'énergie, il est nécessaire d'assurer à tout instant l'équilibre entre la production et la consommation de l'électricité. Ce rôle est joué par le **Responsable d'équilibre**. Celui-ci s'engage contractuellement à financer auprès de RTE le coût des écarts instantanés entre l'électricité produite et l'électricité consommée dans le périmètre dont il a la responsabilité.
Si l'installation bénéficie de l'obligation d'achat, le fournisseur EDF ou l'entreprise locale de distribution concernée assurent ce rôle. Sinon, le producteur doit désigner un responsable d'équilibre, au périmètre duquel l'installation de production sera rattachée.
- Les redevances annuelles liées au comptage que doit verser le producteur sont fixées par la Décision ministérielle du 27.09.2005.

1-3. La vente de l'énergie produite par la centrale :

1-3-1 La vente dans le cadre de l'obligation d'achat :

L'article 10 de la Loi du 10 février 2000, relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité, définit les conditions pouvant contraindre le fournisseur EDF ou une entreprise locale de distribution, à acheter l'énergie électrique d'origine renouvelable.

a. Le cadre réglementaire :

L'arrêté du 22 avril 2007 fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie hydraulique des lacs, cours d'eau et mers.

Peuvent bénéficier de ces dispositions :

- les centrales mises en service pour la première fois après la date de publication de l'arrêté.
Toutefois, d'après l'arrêté du 1^{er} mars 2005, une installation rénovée **peut être réputée mise en service pour la première fois** si le montant des investissements liés à cette rénovation atteint une certaine valeur. Par exemple, une installation de puissance inférieure à 100 kW bénéficie de ces dispositions si les investissements atteignent 835 € par kW installé.
Le même texte précise la nature des travaux et des investissements pouvant être pris en compte pour le calcul de ce montant.
- les centrales dont la puissance maximale et la productibilité moyenne annuelle ont été augmentées de 10%, pour l'énergie supplémentaire ainsi produite.
- les installations mises en service avant le 22.04.07 et qui n'ont jamais bénéficié de l'obligation d'achat. Cependant le tarif d'achat décroît proportionnellement à l'âge de la centrale.

Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 20 ans.

En métropole, le producteur peut opter pour une tarification à une, deux, quatre ou cinq composantes. Seules les deux premières options sont réellement intéressantes pour les centrales fonctionnant au fil de l'eau.

La tarification à une composante fixe un tarif d'achat constant sur l'année, tandis que celle à 2 composantes définit un tarif d'été (du 1^{er} avril au 31 octobre) et un tarif d'hiver (du 1^{er} novembre au 31 mars). Cette dernière option est fréquemment retenue par les exploitants des micro-centrales, car elle permet de mieux rentabiliser l'installation, l'été correspondant à la période d'étiage, donc de faible production, voire d'arrêt de la centrale.

Les petites centrales bénéficient d'une prime au kW. Celle indiquée dans le tableau ci-dessous concerne les installations de moins de 400kW, qui font l'objet de notre étude.

	Tarif (c€/kWh)	Prime (c€/kWh)	Total (c€/kWh)
Tarif à une composante	6,07	2,50	8,57
Tarif à 2 composantes			
Hiver	8,38	3,45	11,83
Eté	4,43	1,82	6,25

En fonction de la régularité de leur production hivernale, les centrales peuvent bénéficier d'une majoration de qualité, pouvant atteindre 1,68 c€/kWh.

Cas particulier des installations de puissance inférieure à 36 kVA :

Les exploitants de centrales d'une puissance maximale inférieure ou égale à 36 kVA peuvent choisir de bénéficier soit des conditions de l'arrêté ci-dessus, soit de celles fixées par l'arrêté du 13 mars 2002, pouvant s'appliquer à toute installation de production de moins de 36 kVA, utilisant les énergies renouvelables.

Peuvent bénéficier de ces dispositions les centrales de moins de 36 kVA mises en service pour la première fois après le 7 septembre 2004 (date de publication de l'arrêté modifiant le texte initial).

Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 15 ans.

Si le producteur est déjà lié à l'acheteur par un contrat de fourniture, le tarif d'achat est égal au tarif de vente hors taxes. C'est-à-dire, en 2007 : 7,87 c€/kWh pour l'option de base ; 7,87 c€/kWh en heures pleines ; 4,63 c€/kWh en heures creuses,....

Si le producteur et l'acheteur ne sont pas liés par un contrat de fourniture, le tarif d'achat est égal au tarif de vente appliqué à un consommateur domestique pour une installation de la même puissance souscrite : 7,87c€/kWh en 2007, pour une installation de plus de 3kW.

La production annuelle est plafonnée au produit de la puissance souscrite multipliée par 8400 heures (350 jours). Cette valeur limite ne sera cependant jamais atteinte sur une microcentrale bien dimensionnée.

Une installation mise en service avant la date de publication de l'arrêté et qui n'a jamais bénéficié de l'obligation d'achat peut également bénéficier de l'achat de l'énergie, au tarif de 4,42 c€/kWh.

Remarques :

- Une installation ne peut bénéficier **qu'une fois** d'une obligation d'achat.
- Les tarifs d'achat de l'énergie mentionnés ci-dessus sont réévalués chaque année en fonction de l'évolution du coût de la vie.

b. Les démarches : (Le détail des démarches est expliqué dans la Fiche 7)

Pour obtenir son contrat d'achat, le producteur doit :

- obtenir de la DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement) un **Certificat ouvrant droit à l'obligation d'achat**. Ce document atteste que l'installation entre effectivement dans la cadre de la loi sur l'obligation d'achat ;
- signer un **Contrat d'achat** avec le fournisseur EDF ou avec l'entreprise locale de distribution gérant son secteur géographique.

1-3-2 Vente de l'énergie aux fournisseurs du marché – Enercoop, un partenaire potentiel.

En dehors du cadre de l'obligation d'achat, l'exploitant d'une centrale hydroélectrique peut conclure un contrat d'achat avec l'un des fournisseurs du marché ouvert de l'électricité. Les conditions d'achat de l'énergie produite sont alors définies par un contrat négocié entre le producteur et le fournisseur / acheteur.

Tandis que les principaux fournisseurs ne paraissent pas vraiment convaincus de l'intérêt d'une telle démarche, la coopérative **Enercoop**, qui fit son apparition sur le marché début 2006 et dont les motivations s'inscrivent parfaitement dans la logique du développement durable, peut devenir un partenaire privilégié du futur producteur.

Enercoop est une Société Coopérative d'Intérêt Collectif (SCIC)* créée en 2005 et ayant pour objectifs le développement de la production d'électricité d'origine renouvelable, et l'incitation à la maîtrise de la consommation d'énergie.

Elle se distingue des autres fournisseurs par sa forme coopérative, son offre d'électricité éthique et à 100% d'origine renouvelable.

Comme la traçabilité physique de l'électricité est impossible (comment distinguer un électron « vert » d'un autre ?), Enercoop assure sa traçabilité commerciale : la quantité d'énergie vendue aux clients correspond à celle achetée aux producteurs exploitant les énergies renouvelables.

L'électricité achetée aux producteurs, membres de la coopérative, est acheminée par le réseau public de transport et de distribution, auprès duquel la coopérative s'acquitte d'un droit d'accès proportionnel à son utilisation. Elle est ensuite fournie aux clients, qui peuvent être sociétaires ou non de la coopérative, à un prix qui inclut le coût de l'énergie et le coût d'accès au réseau.

Cette commercialisation répond aux principes du commerce équitable :

Les producteurs perçoivent une rémunération juste qui dépend de la filière (hydraulique, éolien, photovoltaïque) et qui est fixée de manière à permettre un retour sur investissement suffisant pour assurer le développement de chaque filière.

Le consommateur, en payant l'électricité au prix juste, participe au développement des énergies renouvelables.

Enercoop comptait 1000 usagers fin septembre 2007 et prévoit une croissance soutenue qui devrait lui permettre de franchir le cap des 10 000 consommateurs début 2009.

La coopérative accueille les producteurs d'électricité exploitant les énergies renouvelables, y compris ceux dont l'installation ne peut plus bénéficier de l'obligation d'achat.

Les conditions d'achat de l'énergie sont librement convenues entre le producteur et Enercoop, en fonction des particularités de l'installation. En ce qui concerne l'électricité d'origine hydraulique, les tarifs proposés sont équivalents à ceux fixés pour les centrales récentes par le cadre de l'obligation d'achat. De ce fait, ils sont particulièrement avantageux pour les centrales anciennes, dont la rémunération, dans le cadre réglementaire, serait très faible.

Il faut cependant noter que pour maintenir l'équilibre entre la quantité d'énergie injectée au réseau et celle soutirée par ses usagers, Enercoop a établi une file d'attente des producteurs : le nombre des producteurs admis dans la coopérative augmentera parallèlement à celui des consommateurs.

Etant donné qu'EDF ne joue le rôle de « responsable d'équilibre » que dans le cadre d'une obligation d'achat, c'est une société partenaire d'Enercoop qui assure cette fonction pour les producteurs membres de la coopérative.

2. Raccordement au réseau avec consommation de la totalité de la production.

Cette option est bien adaptée aux moulins de petite puissance (quelques kilowatts) qui bénéficient déjà d'un raccordement au réseau public pour l'alimentation des différents récepteurs du site, par exemple lorsque celui-ci sert de logement.

Le propriétaire d'un tel aménagement pourrait en effet être tenté, à la mise en service de son installation hydroélectrique, de dénoncer son contrat de raccordement au réseau, afin d'être autonome du point de vue énergétique, ou encore d'équiper son installation d'un système de commutation automatique permettant d'alimenter ses récepteurs soit par sa centrale, lorsque la production de celle-ci est suffisante, soit par le réseau public, dans le cas contraire.

Conserver le branchement existant au réseau de distribution et y raccorder l'installation de production, y compris lorsque la vente de l'énergie produite n'est pas envisagée, constitue cependant une alternative intéressante, car elle assure un confort d'utilisation maximal.

Cette solution permet en effet :

- de profiter de la fiabilité et de la qualité du réseau, en particulier de la stabilité de la tension et de la fréquence, plus délicats à obtenir sur une installation autonome ;
- de mettre en œuvre, de manière simple et rationnelle, une génératrice asynchrone, moins coûteuse et laissant un choix infiniment plus large qu'un alternateur ;
- lorsque la consommation est supérieure à la production, de soutirer le complément d'énergie du réseau, sans devoir interrompre le fonctionnement de certains récepteurs ;
- d'assurer la continuité de fonctionnement des récepteurs en cas d'arrêt de la centrale, par exemple en période d'étiage ou lors des opérations de maintenance.

L'installation de production sera raccordée en interne à l'installation de consommation existante, mais sans nécessiter la pose d'un autre compteur, étant donné que toute l'énergie produite sera à priori consommée sur le site même. Le schéma du branchement est donc identique à celui de la page 55, à l'exception du compteur d'injection.

Si l'énergie produite devenait momentanément supérieure à celle consommée, leur différence serait injectée sur le réseau. Cette énergie n'étant pas prise en compte par le compteur de consommation, elle ne serait pas déduite de la facture établie ultérieurement par le fournisseur.

Pour obtenir le droit de raccorder son installation de production au réseau public de distribution, le propriétaire doit effectuer, auprès de son gestionnaire de réseau de distribution, une **Demande de raccordement** similaire à celle établie en vue de la vente de l'énergie produite. Toutefois, la procédure générale à suivre est bien plus simple que celle décrite au paragraphe précédent :

- Etant donné que l'énergie produite n'est pas destinée à la vente, la déclaration d'exploiter, auprès de la Dideme, n'est pas requise.
- De même, les démarches auprès d'un fournisseur, en vue de l'obtention d'un contrat d'achat, n'ont pas lieu d'être.
- Sur la **fiche de collecte de renseignements** jointe à la demande de raccordement, le demandeur précise que « l'énergie produite sera entièrement consommée sur le site et que l'installation de comptage supplémentaire est inutile ». Par la suite, seule une **Convention d'exploitation** formalisera le raccordement de l'installation au réseau.

Bien entendu, comme dans le cas où l'énergie produite est destinée à la vente, l'installation de production devra être munie :

- d'un dispositif de sectionnement assurant sa séparation du disjoncteur de branchement au réseau, permettant de garantir la sécurité des personnes devant intervenir sur ces circuits en vue d'opérations d'entretien ou de réparations.
- d'une protection de découplage assurant automatiquement sa séparation du réseau public en cas de défaut sur ce dernier (voir page 48 et Fiche 6).

XII. L'aspect environnemental :

Le porteur d'un projet de réhabilitation d'un aménagement hydraulique est fréquemment confronté à deux tendances opposées :

- D'une part, son projet pourra susciter des réserves, pour ne pas dire l'hostilité, de la part de pêcheurs, de riverains, d'associations de protection de l'environnement, voire de certains organismes officiels chargés de la défense du milieu aquatique. Ces détracteurs mettent en avant les impacts négatifs des aménagements hydrauliques sur l'écosystème aquatique, et prônent souvent la renaturation des cours d'eau par l'effacement des seuils et des barrages.
- D'autre part, certains producteurs d'hydroélectricité ne se préoccupent guère de l'impact environnemental de leur installation et se focalisent uniquement sur leur production d'électricité, sous le prétexte que celle-ci est obtenue à partir d'une ressource renouvelable et ne libère aucun gaz à effet de serre.

Le futur producteur qui souhaite s'engager dans une démarche de développement durable se démarquera bien entendu de ces attitudes extrêmes :

- A juste titre, il pourra faire remarquer à ses détracteurs qu'au XIX^e siècle, la population piscicole était florissante alors que les moulins étaient très nombreux, et que les poissons furent souvent décimés ultérieurement par d'autres causes. Parmi celles-ci figurent en particulier les pollutions d'origine industrielle et domestique, ou encore liées à l'évolution des pratiques agricoles et forestières. Ainsi, la mise en culture des abords des cours d'eau, jadis laissés en prairie, combinée à la pratique déplorable de laisser les sols à nu durant l'hiver, favorisant leur lessivage, sont à l'origine de la contamination des rivières par les engrais et les pesticides, et, plus simplement, du colmatage de leur lit par la terre qui y est entraînée.
- Par ailleurs, par une approche globale, il s'efforcera de concilier la production d'électricité et la préservation d'un écosystème déjà suffisamment mis à mal par les causes évoquées ci-dessus. A cet effet, la connaissance des impacts négatifs et positifs que son aménagement pourrait avoir sur l'environnement lui permettra de réduire les premiers et d'accroître les seconds¹.

1. Les impacts négatifs :

Un aménagement hydraulique génère effectivement des impacts négatifs sur le milieu aquatique en perturbant la continuité hydrobiologique d'un cours d'eau, voire en occasionnant des pollutions.

- Un seuil représente souvent un obstacle infranchissable pour les poissons et les invertébrés aquatiques. Or, différentes espèces de poissons, comme le saumon, la truite, ... effectuent des migrations plus ou moins longues au cours de leur existence. En empêchant ces poissons d'accéder aux frayères, les barrages contribuent à la régression de leur population. Ils isolent de même les populations piscicoles des différents tronçons d'un même cours d'eau et uniformisent ainsi les peuplements.
- En ralentissant l'écoulement, les seuils peuvent provoquer une altération significative de la qualité du milieu aquatique. D'une part, cette baisse de vitesse favorise le dépôt des sédiments en amont de l'ouvrage ; en s'accumulant, ces matières colmatent le fond de la retenue et perturbent l'habitat de nombreux organismes aquatiques. De plus, les nutriments et les minéraux ainsi piégés feront défaut en aval de l'ouvrage. D'autre part, ce ralentissement de l'écoulement favorise l'élévation de la température de l'eau en été et la réduction de sa teneur en oxygène. La combinaison de ces divers phénomènes peut entraîner la prolifération d'algues, aggravant la sédimentation de la retenue. Ces différentes dégradations du milieu nuisent évidemment à sa biodiversité.
- La réduction du débit dans le tronçon d'une rivière court-circuité par un canal de dérivation, entraîne une baisse du niveau de l'eau et un ralentissement de l'écoulement. Ces altérations réduisent la capacité d'auto-épuration de cette portion du cours d'eau et peuvent occasionner, au fil des saisons, des variations importantes de la température, néfastes au développement de la vie aquatique.

¹ Voir en particulier : OFEN (CH) – Petites centrales hydrauliques et écologie des eaux.

- Les canaux de dérivation peuvent être des milieux de faible intérêt biologique. Par ailleurs, le canal de fuite d'une centrale est souvent une impasse où les poissons s'épuisent en cherchant une issue pour remonter le cours d'eau.
- Le passage des poissons par les turbines, au cours de leur avalaison, peut présenter de sérieux risques de mortalité, déjà évoqués lors de l'étude de ces machines.
- Les centrales peuvent être à l'origine de pollutions chroniques ou accidentelles par les fuites de l'huile utilisée pour la lubrification des paliers des machines ou pour la commande des vérins actionnant les vannes et le dégrilleur. De même, à l'occasion des travaux d'entretien des ouvrages, des effluents de peinture ou des résidus de bétonnage peuvent contaminer l'eau.
- Le relargage des sédiments, lors des vidanges ou des purges de la retenue d'eau, peut provoquer une importante pollution « mécanique ». Ces matières, en se déposant à l'aval de la centrale, colmatent le fond du cours d'eau et dégradent ainsi les conditions de vie de l'ensemble la faune aquatique.
- Enfin, au-delà du milieu aquatique, une centrale peut générer des nuisances sonores, du fait même du fonctionnement de ses différents constituants (turbine, roue à aubes, dégrilleur, ...).

2. Les impacts positifs :

En plus de la production d'une énergie propre, évitant le rejet de plus de 570 kg de CO₂ pour 1000 kWh produits (voir l'annexe, page 66), les aménagements hydrauliques peuvent présenter de multiples atouts au niveau environnemental :

- La retenue d'eau créée en amont d'un seuil constitue une zone de refuge pour les poissons par basses eaux. Elle élève également la hauteur de la nappe phréatique, limitant ainsi les effets des sécheresses.
- Ses eaux calmes sont propices au développement de certaines espèces de poissons tels que les gardons, les brèmes,.... La retenue d'eau peut ainsi augmenter la biomasse d'un cours d'eau.
- Un barrage peut empêcher certaines espèces exogènes envahissantes, comme la perche soleil ou le hotu, de coloniser des portions d'un cours d'eau.
- Un canal de fuite peut devenir une zone de refuge pour les poissons lors des crues.
- Une roue à aubes et la chute d'eau d'un déversoir contribuent à l'oxygénation de l'eau, ce qui accroît sa capacité d'auto-épuration.
- Une centrale équipée d'une grille retenant les débris flottants contribue à l'amélioration de la qualité de l'eau.
- Un seuil peut limiter temporairement l'extension d'une pollution.

Au-delà du milieu aquatique, les seuils peuvent également exercer une influence bénéfique sur l'environnement humain¹ :

- Un seuil correctement dimensionné peut stopper l'érosion régressive pouvant caractériser un cours d'eau, et protéger ainsi les fondations d'un pont ou d'une digue situés immédiatement en amont.
- Un seuil bien situé peut être un élément important dans l'écrêtage des crues : en relevant la ligne d'eau, il peut favoriser l'inondation de zones peu vulnérables, telles que les prairies, les zones agricoles, et protéger ainsi les secteurs habités situés en son aval.
- Par l'élévation de la nappe phréatique, certains ouvrages permettent de maintenir l'alimentation de captages d'eau potable durant les périodes de sécheresse.
- Certaines retenues d'eau associées à des moulins ou à des microcentrales sont appréciées pour la baignade. Elles épargnent ainsi aux habitants des environs des déplacements vers des centres nautiques ou la construction de piscines individuelles.

¹ CEMAGREF & EPIDOR - Guide technique - Restauration et entretien des seuils – Bassin de la Cère.

3. Pistes de réflexion et d'amélioration :

Différentes solutions permettent de réduire les impacts d'une microcentrale sur l'environnement^{1 2} :

a) Le franchissement des seuils par les poissons :

Un dispositif assurant le franchissement du seuil par les poissons est indissociable de tout aménagement qui se veut exemplaire d'un point de vue environnemental.

Par ailleurs, l'obligation légale existe sur les cours d'eau classés au titre du franchissement des poissons migrateurs, dont la liste est fixée par décret (Voir chapitre III, Note à la page 15).

En particulier, les ouvrages existants disposent d'un délai de 5 ans, **à compter de la publication d'une liste d'espèces migratrices**, pour être mis en conformité avec les dispositions réglementaires.

Pour être efficace, un dispositif de franchissement doit être adapté aux conditions locales, telles que la population piscicole, le débit du cours d'eau, la nature de l'obstacle à franchir,....

Sa conception nécessite de solides compétences et ne peut laisser aucune place à l'improvisation ou à l'amateurisme. Un porteur de projet pourra bénéficier de l'expertise de l'Office National de l'Eau et du Milieu Aquatique (ONEMA) pour l'étude d'un tel ouvrage.

Différents dispositifs de franchissement sont couramment mis en oeuvre :

- les canaux latéraux, véritables petits cours d'eau aménagés pour contourner un ouvrage ;
- les passes à bassins successifs ;
- les passes à ralentisseurs,.....



Passage à poissons à bassins successifs



Passage à poissons à ralentisseurs

Une passe à poissons devra être complétée, le cas échéant, par un dispositif détournant les poissons du canal de fuite de la centrale. Un système de chicanes ou des pierres disposées de manière à ralentir et à diffuser l'écoulement peut donner de bons résultats, sans qu'il soit nécessaire de recourir aux barrières acoustiques ou électriques utilisées sur les grandes centrales.

Après sa construction, le dispositif de franchissement doit être régulièrement entretenu pour éviter que l'accumulation de débris flottants ou la végétation n'empêchent le passage des poissons.

La création d'un dispositif de franchissement génère évidemment un surcoût, qui peut cependant être atténué si la passe est construite lors de la réfection du seuil.

b) Aménagement de la retenue d'eau et des ouvrages de dérivation

L'aménagement de la retenue d'eau, du canal de dérivation et du tronçon court-circuité, doit recréer un milieu diversifié, le plus proche possible de l'état naturel.

¹ OFEN (CH) – Petites centrales hydrauliques et écologie des eaux.

² ADEME - Guide d'accompagnement vers la certification ISO 14001.

Par exemple, il est souhaitable que la végétation des berges soit variée et adaptée au site.

c) Le débit réservé :

Habituellement, l'écoulement du débit réservé est assuré par une échancrure calibrée du seuil ; la quantité déversée étant liée au niveau de la retenue, ce dernier doit être maintenu à une valeur convenable par un système de régulation qui ajuste le débit absorbé par le moteur hydraulique en fonction de ce niveau.

Il est à noter que la passe à poissons associée à un seuil peut être dimensionnée de manière à véhiculer le débit réservé du cours d'eau.

d) Travaux sur les ouvrages :

Les travaux sur les ouvrages devront toujours être pensés et réalisés de manière à minimiser leur impact sur l'environnement. Ils seront effectués à sec, derrière des batardeaux*, pour éviter le brassage et l'entraînement des sédiments ou des résidus de bétonnage par le courant.

Les différentes interventions affectant le cours d'eau seront obligatoirement signalées à la DDAF.¹ (Voir chapitre III, page 15).

Si une partie du bief doit être mise à sec, il est judicieux d'en informer au préalable l'Association de pêche et de protection du milieu aquatique (APPMA) locale, afin qu'elle puisse organiser le sauvetage des poissons, par exemple au moyen d'une pêche à l'électricité.

Après une longue période de non utilisation d'un aménagement, son seuil peut retenir une quantité importante de sédiments, plus ou moins pollués. Lors de la remise en service de l'installation, ces matières ne pourront en aucun cas être larguées dans le cours d'eau, mais devront être extraites.

Auparavant, un prélèvement de ces sédiments sera expédié au Laboratoire Départemental d'Analyses, en vue de la détection d'éventuels polluants, tels que pesticides ou métaux lourds.

Leur extraction mécanique sera ensuite effectuée à sec, afin d'éviter toute pollution mécanique du cours d'eau.

Les matériaux minéraux sains, tels que le sable ou le gravier, pourront être avantageusement valorisés sur des chantiers de construction ou de travaux publics, après leur séparation des matières organiques. En revanche, les sédiments pollués devront être dirigés vers des décharges dont la classe dépend de la concentration des polluants, ou être traités. Leur maintien en décharge ou leur traitement auront évidemment une forte incidence sur le coût de la réhabilitation.

e) Les « chasses » :

Après la remise en service d'un aménagement, il est souhaitable de procéder à des purges régulières pour éviter l'accumulation d'une grande quantité d'alluvions à l'amont du seuil.

Ces « chasses » seront pratiquées en dehors de la période de reproduction des poissons, et de préférence lors d'une crue naturelle, afin que les sédiments soient dilués par l'apport d'eau et pour que la vitesse de l'écoulement limite leur dépôt à l'aval. Les variations du débit devront être progressives pour ne pas causer de dommages à la faune aquatique.

Ces opérations répétitives font l'objet d'une déclaration unique auprès de la DDAF.

f) Gestion des déchets flottants :

Les grilles de protection des centrales à turbines retiennent les débris flottants naturels, tels que le bois, les feuilles mortes, mais aussi des détritus issus de l'activité humaine, tels que des sachets plastiques, des bouteilles, ...

La question de la gestion de ces débris reste posée, étant donné qu'il n'existe en France aucune réglementation les concernant, contrairement à la Suisse où l'exploitant de la centrale est tenu de les éliminer par les moyens appropriés.

¹ Voir la Nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration, en application des articles L. 214-1 à L. 214-6 du Code de l'environnement.

Aussi certains exploitants remettent-ils l'ensemble de ces débris à l'eau.....

La solution idéale consisterait à trier les débris flottants afin d'éliminer ou de recycler les débris, de valoriser le bois, et de composter ou de remettre à l'eau les feuilles mortes et les végétaux aquatiques, qui font partie de l'écosystème du cours d'eau. Cependant, cette activité représente une occupation importante, qui n'est encore ni reconnue, ni indemnisée.

L'évacuation de l'ensemble des déchets recueillis vers une décharge ou une usine d'incinération constitue une autre alternative, mais elle peut être onéreuse, voire contreproductive d'un point de vue environnemental. D'après l'AJENA¹, en fonction des saisons, les débris peuvent être mêlés aux substances naturelles dans la proportion de 1 pour 10 (1 tonne de débris pour 10 tonnes de matériaux naturels). L'élimination des substances naturelles peut priver l'écosystème du cours d'eau de nutriments intéressants, tandis que leur transport génère les nuisances bien connues et entraîne un surcoût non négligeable.

g) Prévention de la pollution :

Les risques de pollution par les lubrifiants ou par l'huile utilisée par les organes de manœuvre hydrauliques peuvent être minimisés par l'adoption de quelques règles simples :

- la vérification périodique de l'état des paliers et des flexibles des vérins ;
- la présence de bacs de rétention sous le groupe hydraulique et les réservoirs de stockage ;
- le stockage des récipients au-delà du niveau des inondations ;
- l'utilisation systématique d'huile biodégradable, à base végétale (huile alimentaire) ;
- l'utilisation d'actionneurs électriques.

h) Lutte contre le bruit :

Les nuisances sonores peuvent entraîner une gêne du voisinage. Si les locaux peuvent être facilement insonorisés par les moyens conventionnels, les équipements extérieurs, par exemple associés à des roues à aubes, des vis ou des siphons, posent plus de problèmes.

Les émissions sonores de ces appareils peuvent être réduites au moyen de dispositifs anti-vibrations ou de caissons adaptés.

La réglementation en vigueur² limite les valeurs de l'émergence aux seuils suivants : 5 dB(A) de jour, de 7 h à 22 h ; 3 dB(A) de nuit, de 22h à 7h. Etant donné qu'une microcentrale fonctionne habituellement en continu, la valeur nocturne est la plus contraignante.

Annexe : rendement de production et émission de CO₂ en fonction de la filière³ :

Filière :	Rendement électrique max sur combustible fossile (%)	Emissions en kg de CO2 pour 1000 kWh électriques.
Thermique charbon à lit fluidisé circulant	46,1	750
Nucléaire	Infini	0
Hydraulique	Infini	0
TAC ⁴ à gaz	36,6	570
TAC à fioul	34,7	830
Cycle combiné gaz	59,1	355
Eolien	Infini	0

¹ AJENA - L'énergie hydroélectrique - Comment rénover son moulin en préservant l'environnement.

² Circulaire du 27.02.1996 relative à la lutte contre les bruits de voisinage.

³ D'après le Rapport Dambrine.

⁴ TAC : turbine à combustion.

XIII. L'aspect humain :

La réhabilitation d'un petit aménagement hydraulique aura le plus souvent des répercussions limitées au niveau humain. Par conséquent, un projet qui, d'une part, préserve l'environnement et qui, d'autre part, respecte les droits et ménage les intérêts des riverains ainsi que des principaux usagers du cours d'eau (pêcheurs, adeptes des sports nautiques,...), sera le plus souvent bien accepté.

Cette perception positive pourra encore être renforcée par une bonne information du public quant à la teneur et aux enjeux du projet, puis par l'écoute des doléances pouvant être formulées.

Comme pour l'aspect environnemental, notre objectif sera de minimiser les effets négatifs et de maximiser les effets positifs de la réhabilitation d'un site.

1. La prise en compte des effets négatifs :

- La montée de la ligne d'eau en amont du seuil, si les vannes de ce dernier étaient précédemment levées ou retirées, et la remise en eau d'ouvrages de dérivation dégradés peuvent dans certains cas occasionner l'inondation de propriétés riveraines.

Une inspection minutieuse de l'ensemble de l'aménagement et l'évaluation exacte des conséquences de la remontée des eaux, permettent souvent d'éviter ces désagréments.

De même, des entretiens avec les riverains et les responsables de l'APPMA locale pourront nous rendre attentifs à d'éventuelles dégradations des ouvrages, ainsi qu'à certaines contraintes que nous aurions négligées jusqu'alors.

- Sur un cours d'eau où sont pratiqués les sports nautiques, les ouvrages hydrauliques sont tenus de garantir la libre circulation des embarcations, telles que les canoës et les kayaks. Alors que ceux-ci peuvent facilement emprunter les seuils de section triangulaire, les seuils verticaux constituent pour eux une barrière infranchissable. De ce fait, ces derniers devront être munis d'une passe appropriée, qui peut également servir à la dévalaison des poissons.



Passe de dévalaison et à canoës sur le Blavet (56).

- Les nuisances sonores, qui peuvent représenter un problème crucial si la centrale est située dans une zone habitée, ont été traitées au chapitre précédent (voir page 66).

2. Des points positifs à développer :

- Le diagnostic et, le cas échéant, la réfection du seuil sont indissociables de toute réhabilitation d'un aménagement hydraulique. Ces opérations, qui permettent de renforcer la sûreté de l'ouvrage, sont toujours appréciées par les riverains dont les propriétés seraient menacées par une rupture accidentelle du barrage.

L'enlèvement des embâcles et l'entretien régulier des berges sur toute l'étendue du bief renforceront cet aspect positif : en facilitant l'écoulement de l'eau, ces travaux réduisent les risques d'inondation des propriétés voisines.

- Certaines entreprises spécialisées proposent une rénovation clé en main des installations hydroélectriques. Toutefois, il est souvent préférable de faire appel aux entreprises locales pour les travaux de génie civil, le curage de la retenue d'eau, la fabrication de certaines pièces mécaniques (vannes,...), le câblage électrique, ainsi que pour la maintenance qui suit la mise en service de l'installation. De cette manière, l'économie locale profitera de l'opération, les déplacements et leurs nuisances seront limités, et les dépenses sensiblement réduites.
- Bien que peu de porteurs de projets songent à cette solution, le partenariat avec des établissements supérieurs d'enseignement technique (classes de BTS des Lycées Techniques, Instituts Universitaires de Technologie) et les Ecoles d'Ingénieurs peut être particulièrement bénéfique. Ces

établissements disposent en effet des compétences et d'un réel savoir-faire dans de nombreuses disciplines, telles que la mécanique, l'automatique, l'électricité,... et possèdent les outils nécessaires à la conception et à la réalisation de systèmes techniques complexes.

L'étude et le câblage de l'armoire électrique, la programmation de l'automate, le développement d'un programme de supervision pourront ainsi faire l'objet de projets menés par les étudiants sous la direction de leurs professeurs.

La remise en service d'une microcentrale pourra ainsi contribuer à la formation des étudiants avec, pour contrepartie, une réduction considérable des coûts de conception.

Une seule ombre au tableau : les délais peuvent être longs !

- D'autres partenariats originaux peuvent également voir le jour :

D'une part, certains propriétaires disposent d'un aménagement présentant un potentiel intéressant; cependant sa rénovation clé en main serait trop onéreuse, et eux-mêmes ne disposent ni des compétences, ni du temps nécessaire pour entreprendre ou coordonner ces travaux.

D'autre part, des personnes souhaitant participer au développement des énergies renouvelables possèdent de réelles compétences, mais ne disposent ni du site nécessaire à l'expression de leur talent, ni des possibilités financières pour acquérir un moulin.

Propriétaires et passionnés peuvent se rencontrer au sein d'une association pour mener un partenariat profitable aux deux parties. Des expériences de ce type sont pratiquées par l'association Eco-Energie, dans les Vosges.

- Une petite centrale hydroélectrique se situe à l'intersection de la production d'électricité à partir d'une ressource renouvelable, et d'un milieu sensible : le cours d'eau. De ce fait, elle peut devenir un remarquable outil pédagogique au service de la promotion des énergies renouvelables, des économies d'énergie, ainsi que de la protection de l'environnement.

En effet, par la diversité et la taille de ses ouvrages (seuil, canal de dérivation, vannages,) la microcentrale hydraulique illustre bien les efforts et les investissements nécessaires pour produire de l'électricité à partir d'une ressource renouvelable. Par ailleurs, comme elle permet à chacun de prendre conscience que l'énergie produite, intimement liée au régime du cours d'eau, n'est pas illimitée, elle peut susciter un changement d'attitude par rapport à l'utilisation de l'énergie électrique, trop souvent dilapidée, et réellement inciter à l'économiser.

A cet effet, une salle des turbines pourrait être aménagée en local d'exposition destiné à accueillir les groupes scolaires et le public, à l'occasion de visites programmées ou de journées portes ouvertes. L'exposition, qui s'articulerait autour de l'installation de production d'énergie, porterait bien entendu sur l'hydroélectricité et les différentes énergies renouvelables, ainsi que sur les moyens et les gestes simples permettant d'économiser l'énergie.

Cependant, le cours d'eau, la vie de ses habitants et la protection de son écosystème seraient tout autant mis en valeur, de même que les indispensables compromis permettant de concilier l'utilisation de l'énergie hydraulique et la préservation du milieu aquatique.

Les traditionnels panneaux explicatifs et des maquettes de machines pourraient être complétés par des écrans d'ordinateurs affichant les principaux paramètres fournis par le dispositif de supervision (débit exploité et production d'électricité instantanés, courant injecté au réseau, évolution de la production au fil des ans...), voire par des démonstrations de couplage et de découplage de la génératrice au réseau.

Comme il est toujours décevant de se retrouver en présence d'une installation dont les principales caractéristiques restent inconnues, des panneaux apposés à l'extérieur du site informeraient en permanence le public sur le type et les particularités de l'aménagement (par exemple la nature et les performances du moteur hydraulique, la production énergétique, la quantité de CO₂ non émise du fait du fonctionnement de la centrale,...).

Un affichage électronique en temps réel de la puissance générée et de l'énergie produite durant l'année en cours pourrait compléter efficacement ces informations.

XIV. L'aspect patrimonial et architectural :

Certains moulins présentent un intérêt patrimonial indéniable en raison de leurs caractéristiques architecturales, techniques ou historiques.

Leur réhabilitation doit être pensée et menée de manière à préserver ces particularités, tout en valorisant au mieux la ressource hydraulique.

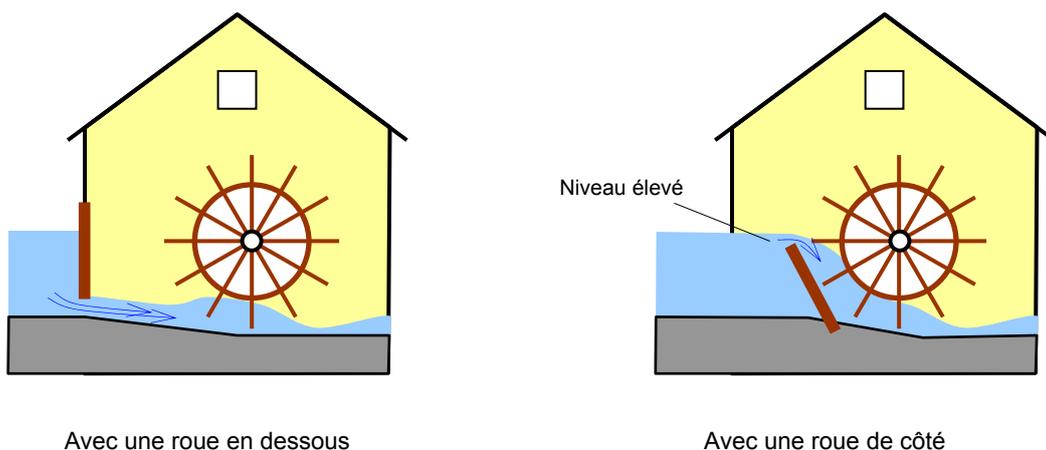
Jadis, lorsque les turbines en chambre d'eau étaient les seules alternatives performantes aux roues à aubes traditionnelles, de nombreux sites furent irrémédiablement dénaturés lors de l'implantation de l'une de ces machines. Bien souvent, le bâtiment du moulin fut rasé en vue de la construction de la chambre d'eau et du local destiné à abriter la turbine ou l'installation électrique associée. Au cours d'une telle modernisation, le mécanisme de meunerie, constitué des meules et de leur système de transmission, a fréquemment disparu, en dépit de sa valeur patrimoniale.

Actuellement, les turbines axiales, les vis hydrodynamiques et les roues à aubes modernes permettent de tirer le meilleur parti de la ressource hydraulique, sans nécessiter un tel sacrifice. Ces machines s'implantent parfaitement dans les canaux existants, tandis que leur multiplicateur et leur génératrice peuvent prendre place sans problème en plein air (voir p 35). Il est ainsi tout à fait possible de valoriser un aménagement hydraulique, tout en préservant les bâtiments existants et les précieux témoins des techniques passées qu'ils pourraient encore abriter.

Ces constructions seront rénovées en fonction de leur nouvelle destination : un bâtiment d'une grande valeur patrimoniale pourra être restauré de manière à retrouver son aspect d'origine. Toutefois, s'il est destiné à servir de logement, sa réhabilitation tirera au mieux profit des techniques assurant le bien être de ses occupants, tout en minimisant sa consommation énergétique. Les locaux des moulins étant souvent humides, une ventilation conséquente est à prévoir.

Deux autres points cruciaux doivent également être pris en compte :

- Les moulins sont particulièrement exposés aux crues. Il est important d'en tenir compte quant au choix des matériaux et à l'affectation des locaux, en particulier de ceux situés au rez-de-chaussée. Les matériaux sensibles à l'humidité, tels que les plaques de plâtre, sont à proscrire.
- Si une roue de côté doit remplacer une ancienne roue en dessous, le niveau de l'eau dans le canal d'alimentation sera plus élevé qu'auparavant en raison du principe même de fonctionnement de ce type de machine. Par conséquent, il sera indispensable de revoir l'étanchéité de la portion du canal situé en amont de la roue, en particulier lorsque le pied du bâtiment constitue l'une des parois de ce canal. En effet, une étanchéité défectueuse se traduirait inévitablement par des infiltrations d'eau dans le bâtiment, ou du moins par d'importantes remontées capillaires.



Les techniques de réhabilitation des ouvrages hydrauliques, et plus particulièrement des seuils, sont bien maîtrisées et ont fait l'objet des publications citées en page 23. Pour la fabrication du béton nécessaire à cette réfection, il est possible, afin de préserver les ressources naturelles, de remplacer le gravier par du béton recyclé issu de chantiers de déconstruction ; cependant les qualités de résistance du produit fini doivent être garanties par le fournisseur.

XV. L'aspect économique :

La conversion d'un moulin ou la réhabilitation d'une ancienne microcentrale hydroélectrique représentent souvent un investissement important, en particulier du fait du coût du moteur hydraulique et de celui de la réfection des ouvrages.

Par ailleurs, en raison de la faible rémunération de l'électricité d'origine hydraulique, comparée par exemple à celle d'origine photovoltaïque, le temps de retour sur investissement est généralement long. Cependant, du fait de la durée de vie élevée de l'installation et de son coût de maintenance réduit, cette contrainte est généralement acceptable, en particulier pour des aménagements d'une puissance de plusieurs dizaines de kW.

La rénovation d'un aménagement hydraulique constitue donc un placement à long terme, s'apparentant à l'immobilier.

Dans le milieu de l'hydroélectricité, il est généralement admis qu'une puissance brute de plus de 40 kW, qui correspond approximativement à un produit de la hauteur de la chute (en m) et du débit d'équipement (en m^3/s), supérieur à 4 ($H.Q_e \geq 4$), permet de garantir un temps de retour sur investissement convenable.

Toutefois, une puissance brute de 100 kW semble être un minimum pour pouvoir espérer vivre de la vente de l'énergie produite.

A l'autre extrémité de l'échelle des puissances, de nombreux moulins de moins de 10 kW sont restaurés par des propriétaires avant tout soucieux de préserver et de mettre en valeur leur patrimoine, et qui ne recherchent pas forcément la rentabilité financière. Celle-ci serait d'ailleurs difficile à obtenir en raison de la production relativement modeste d'un petit aménagement et du coût élevé de ses équipements, en particulier du moteur hydraulique.

1. Le coût de la réhabilitation

En règle générale, il est difficile de pré-établir le coût de la réhabilitation d'un moulin ou d'une centrale hydraulique, étant donné que celui-ci dépend de l'état général de l'aménagement, de sa puissance, de la hauteur de la chute et des équipements qu'il est possible de remettre en service.

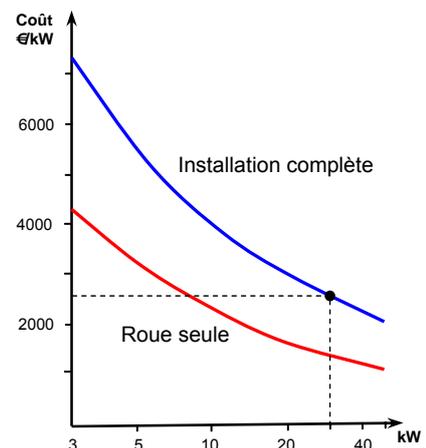
• Moteurs hydrauliques :

Le coût d'un moteur hydraulique est lié à sa technologie (turbine, vis hydrodynamique, roue), à sa puissance et à la hauteur de la chute pour laquelle il est conçu. Ainsi, un moteur prévu pour une très basse chute (< 2 m) sera plus onéreux qu'une machine de même type et de même puissance, conçue pour une chute plus élevée.

Il faut par ailleurs remarquer qu'à l'intérieur d'une même famille technologique, le prix d'un moteur n'est pas proportionnel à sa puissance.

Un élément de référence particulièrement significatif nous est fourni par son prix au kW : plus la puissance nominale du moteur hydraulique est faible et plus son prix au kW est élevé.

Par exemple, le fabricant allemand de roues à aubes DREWS donne la courbe ci contre pour ses roues en dessus.



Evolution du prix au kW de roues en dessus

D'après ce graphique, une installation complète comportant une roue de 3 kW reviendra à 7 200 € / kW, soit à 21 600 € au total, tandis qu'une autre, munie d'une roue de 30 kW, ne coûtera que 2 500 € / kW, soit 75 000 € en tout. Ainsi, la machine de 30 kW, qui produira approximativement 10 fois plus d'énergie par an que celle de 3 kW, ne coûtera que 3,4 fois plus que cette dernière.

Nous constatons ainsi que pour optimiser le temps de retour sur investissement, le futur producteur aura toujours intérêt à maximiser la puissance de son installation, dans les limites permises par le

droit d'eau. Cette règle est générale : le prix au kW des autres familles de moteurs hydrauliques suit des courbes semblables à celles données ci-dessus. Cependant les fabricants sont rarement disposés à les divulguer !

D'autres exemples de coûts seront donnés dans les dossiers, à partir de la page 77.

• Les équipements électriques :

Le prix au kW des équipements électriques évolue également en fonction de leur puissance nominale selon la règle exposée ci-dessus.

A titre d'exemple, le tableau suivant donne le prix de différentes génératrices asynchrones à 2 paires de pôles (1500 tr/min) :

P_{nominale} (kW)	Prix (€)
11	1 700
22	2 960
45	5 763
75	9 360

Les génératrices à 4 paires de pôles (750 tr/min), plus volumineuses et plus lourdes, coûtent près du double.

Le coût des alternateurs à 2 paires de pôles est proche de celui des génératrices asynchrones de mêmes caractéristiques. Cependant, la mise en œuvre des premiers sur une installation couplée au réseau requiert des équipements complémentaires évoqués à la page 45 (≈1200 €)

L'armoire électrique associée à une génératrice de 11 kW revient environ à 7 000 €. Ce coût augmente avec la puissance à gérer, la complexité des régulations (contrôle du niveau de la retenue d'eau, réglage de l'inclinaison des pales de la roue d'une turbine, en association avec l'ouverture de son distributeur) et le nombre de groupes à gérer.

• Les seuils :

Le coût de la réhabilitation d'un seuil dépend de ses dimensions et de son degré de dégradation, qui déterminent l'ampleur des travaux à mener et la quantité des matériaux nécessaires.

D'après une étude du CEMAGREF, publiée en 1997¹, le coût de la reconstruction totale d'un seuil traditionnel de section triangulaire, d'une hauteur d'environ 1,70 m, peut être estimé à 2 550 € par mètre linéaire. La réalisation d'un radier de dissipation, au pied de ce type d'ouvrage, reviendrait à 1 500 € au mètre linéaire. Enfin, le rejointoiement du parement aval d'un ouvrage de même nature coûterait environ 120 € au m².

• Les passes à Poissons :

Les passes à poissons à ralentisseurs sont les moins onéreuses. Afin de minimiser les coûts, la solution idéale consiste à intégrer un tel dispositif au seuil durant la rénovation de ce dernier (≈ 6 000 € pour un dénivelé de 1,5 à 2 m). Son montage dans un seuil sain, qui implique la déconstruction d'une partie de l'ouvrage, est évidemment plus coûteux (≈ 12 000 € pour le même dénivelé que ci-dessus).

Les passes à bassins successifs, qui nécessitent des travaux plus conséquents, sont plus onéreuses (≈ 30 000 € pour le même dénivelé que ci-dessus).

En fonction de la situation géographique de l'ouvrage, le Syndicat en charge du cours d'eau ou la Région peuvent apporter une aide financière à la réalisation d'un dispositif de franchissement.

¹ P. Mériaux,... Mise en œuvre d'une approche intégrée pour le diagnostic des seuils en rivière.

- **La maintenance :**

La maintenance d'une petite centrale hydroélectrique se résume souvent à des opérations préventives, permettant d'anticiper les défaillances. Parmi ces tâches, nous pouvons citer la vérification périodique de l'état de la courroie du multiplicateur de vitesse, le contrôle des niveaux d'huile,... Ces interventions ont un coût limité et peuvent, dans la plupart des cas, être menées par le producteur lui-même.

- **Réduire les coûts :**

Les solutions déjà évoquées au chapitre XIII, telles que les partenariats avec les établissements d'enseignement et les associations, permettent une réduction sensible des coûts.

Bien entendu, lorsque le futur producteur dispose du savoir-faire et du temps nécessaires, sa participation personnelle à la construction, à la réparation ou à la maintenance, ne serait-ce que de certains constituants de l'aménagement, représente une autre source d'économies.

L'achat d'un moteur hydraulique d'occasion, à condition que celui-ci soit convenablement révisé et parfaitement adapté aux caractéristiques de la chute, constitue une autre voie intéressante à explorer.

2. Les aides et les subventions :

a. Installation raccordée au réseau :

- En principe, aucune subvention n'est accordée pour la restauration ou la conversion d'une installation raccordée au réseau.

Cependant, si la réhabilitation est liée à un projet dépassant le cadre de la production d'énergie, par exemple si la centrale doit servir de support pédagogique aux économies d'énergie et aux énergies renouvelables, ou si l'aménagement présente un intérêt patrimonial évident, des subventions peuvent être accordées par l'ADEME, le Conseil Général ou Régional, l'Union Européenne.... Le futur producteur souhaitant bénéficier de ces aides devra effectuer les démarches nécessaires auprès de ces organismes.

- Un crédit d'impôt de 50% portant sur les équipements, matériaux et appareils est accordé jusqu'en décembre 2009. Cet avantage fiscal ne s'applique qu'aux équipements installés dans la **résidence principale** du contribuable, et :

- dans le cas de la vente des excédents de production, si la vente des excédents n'est pas prépondérante par rapport à la capacité de production de l'équipement.
- dans le cas de la vente de la totalité de la production, si la consommation électrique du site est supérieure à la moitié de la capacité de production de l'équipement.

b. Installation en site isolé :

Des aides sont accordées pour alimenter, à partir des énergies renouvelables, une résidence principale, un bâtiment à usage professionnel ou un local touristique, si le coût de l'installation est d'au moins 15% inférieur à celui du raccordement au réseau public. Le montant total des subventions peut alors atteindre 95 % du coût de l'installation.

Par exemple, sur un territoire en régime rural d'électrification, le financement provient du Fonds d'Amortissement des Charges d'Electricité (FACE), à hauteur de 65%, et éventuellement de l'ADEME et de la commune.

Dans certaines régions, le Conseil Régional ou Général et l'Union Européenne peuvent également apporter des aides complémentaires.

Par contre, EDF entretien et dépanne l'installation, puis facture l'électricité au forfait.

3. La fiscalité liée à la vente d'énergie :

a. Les particuliers :

Le Bulletin Officiel des Impôts du 11 juillet 2007 (5B-17-07) définit pour les particuliers, les règles d'imposition des revenus générés par la vente de l'électricité produite à partir des énergies renouvelables.

La vente d'électricité constitue un acte de commerce. Par conséquent, les particuliers producteurs d'électricité sont imposables dans la catégorie des bénéficiaires industriels et commerciaux.

Dans la plupart des cas, la production d'énergie par une installation automatisée qui ne réclame pas « une participation personnelle, directe et continue », n'est pas considérée comme une activité professionnelle. De ce fait, les résultats dégagés sont à déclarer en bénéficiaires industriels et commerciaux non professionnels.

Si le chiffre d'affaires annuel ne dépasse pas 76 300 €, les particuliers bénéficient de plein droit du régime d'imposition des micro-entreprises :

- les revenus sont déclarés en reportant le montant du chiffre d'affaires* sur une déclaration de revenus 2042 C, une fiche complémentaire à la déclaration de revenus standard, à retirer au centre local des Impôts ;
- le montant imposable est déterminé en appliquant un abattement forfaitaire de 71% sur le chiffre d'affaires ;
- les producteurs sont dispensés du dépôt d'une déclaration de résultats.

Les versements de la taxe professionnelle, des cotisations sociales et l'inscription au Registre du commerce ne sont pas requis dans les situations suivantes :

- dans le cas de la vente des excédents de production : si la vente des excédents n'est pas prépondérante par rapport à la capacité de production de l'équipement ;
- dans le cas de la vente de la totalité de la production : si la consommation électrique du site est supérieure à la moitié de la capacité de production de l'équipement.

Enfin, d'après l'article 293b du Code Général des Impôts, les particuliers sont exemptés de la collecte de la **TVA** .

b. Les professionnels :

Le montant de la vente de l'énergie est déclaré avec les recettes de l'activité normale de l'entreprise.

XVI. La conduite du projet :

L'élaboration du projet de réhabilitation d'un aménagement hydraulique en vue de la production d'électricité nécessite une approche globale et progressive du problème. Elle peut être décomposée en 3 étapes :

- la pré-étude ;
- l'étude de faisabilité ;
- la finalisation du projet.

A l'issue de chacune des deux premières étapes, nous pourrons, en fonction des résultats de nos investigations, envisager de poursuivre ou d'abandonner notre projet.

1. La pré-étude ;

Cette première étape nous permet d'identifier les caractéristiques, le potentiel et les qualités du site, et surtout de faire le point sur le droit d'eau, véritable sésame de la réhabilitation d'un aménagement.

a. L'identification du site :

Durant cette première phase, nous prendrons connaissance de l'ensemble du contexte :

- Quelles sont les limites de la propriété ? A quelle zone parcellaire appartient-elle ? Quelles sont les règles d'urbanisme relatives à cette zone ?
- Les différents ouvrages (seuil, canal de décharge,....) font-ils toujours partie de la propriété ? A défaut, les droits de passage permettant l'accès aux ouvrages sont-ils reconnus ?
- Le canal de dérivation traverse-t-il d'autres propriétés ? Quels en sont les riverains ?

Remarques :

- Les plans cadastraux, qui servent de base à cette recherche, peuvent être consultés à la Mairie de la commune où le moulin est établi, mais seuls les services du cadastre du Centre des Impôts dont dépend cette commune sont habilités à en délivrer des extraits.
- Souvent, un cours d'eau matérialise la limite entre les territoires de deux communes. Dans ce cas, il est possible que le bâtiment du moulin appartienne à l'une des communes et qu'un autre élément de l'aménagement, par exemple le canal de décharge, à l'autre. Les plans cadastraux des deux communes devront alors être consultés.

Au cours de ces démarches, nous nous renseignerons en Mairie au sujet des éventuelles contraintes paysagères, architecturales et environnementales s'appliquant au site :

- Le site est-il classé ou inscrit au titre de la protection des monuments et des sites ?
- Fait-il partie d'un parc naturel régional, du réseau *Natura 2000*,.... ?

Enfin, nous recueillerons les informations concernant le cours d'eau :

- Est-il domanial, non domanial (à voir en Mairie) ?
- Est-il « réservé », au titre de la loi de 1919, ou classé au titre du franchissement des poissons migrateurs, en vertu de l'article L432.6 du Code de l'Environnement (voir le site Internet www.ecologie.gouv.fr ; rubrique : réglementation, hydroélectricité) ? Dans ce dernier cas, la liste des espèces migratrices a-t-elle été publiée ? Dans l'affirmative, le seuil devra être impérativement muni d'un dispositif assurant le libre passage des poissons migrateurs.
- Existe-t-il un Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et, dans l'affirmative, quelles exigences impose-t-il à la future centrale ?

b. Le Droit d'eau et la définition de la puissance brute de l'aménagement :

Comme nous l'avons vu au chapitre III, cette phase est capitale pour la suite de notre étude : si le moulin ne dispose pas d'une autorisation perpétuelle d'exploiter l'énergie du cours d'eau, la poursuite du projet est fortement compromise, à moins que nous n'acceptions les différentes contraintes et les aléas liés à la demande d'une autorisation administrative.

Dans un premier temps, nous devons rassembler tous les documents possibles concernant le site, afin de vérifier, à l'aide du logigramme de la page 13, que l'aménagement bénéficie effectivement d'un droit d'eau.

Dans l'affirmative, il nous faudra, dans un second temps, déterminer la consistance de ce droit, qui impose la puissance brute de l'installation.

- Dans le cas d'un aménagement autorisé ou réglementé avant 1919, les données du règlement d'eau fournissent ces informations.
- Dans le cas d'un moulin fondé en titre, les documents d'archives et des éléments visibles sur le terrain permettent de déterminer ces éléments.

A ce stade, il est conseillé de se rapprocher d'une association de défense des moulins, telle que la Fédération Française des Amis des Moulins (FFAM) ou le Syndicat de Défense des Moulins et Cours d'Eau (SDMCE), afin de pouvoir bénéficier de leurs conseils et de leur expertise.

c. Evaluation du potentiel du site :

Cette phase nous permet d'évaluer la puissance disponible ainsi que l'énergie pouvant être produite annuellement (Voir chapitre IV).

- Le cours d'eau est-il équipé d'une station de jaugeage fournissant des données pertinentes ?
- Des corrections doivent-elles être apportées à ces valeurs ; faudra-t-il effectuer des mesures complémentaires ?
- Quelles sont les principales contraintes limitant le débit exploitable ? L'Administration a-t-elle fixé un débit réservé supérieur au 1/10^e du module ? La retenue d'eau alimente-t-elle un captage d'eau potable ou un réseau d'irrigation ?
- Quelle est la hauteur de la chute ?

A partir de ces données, nous aurons une idée approximative de la puissance de l'aménagement et de l'énergie pouvant être produite.

d. Evaluation de l'état des ouvrages :

Au cours de cette dernière phase, nous identifions les points forts et les points faibles du site :

- Quel est l'état général des ouvrages, en particulier du seuil, du canal de dérivation, du vannage, du bâtiment ?
- Existe-t-il une passe à poissons ?
- Le moteur hydraulique existe-t-il toujours ? Dans l'affirmative, présente-t-il des caractéristiques intéressantes ? Est-il susceptible d'être remis en service ?
- Le site est-il accessible aux engins devant évoluer sur le chantier, ou faudra-t-il aménager une voie d'accès ?
- L'installation est-elle raccordée au réseau électrique ? Si l'électricité est destinée à la vente, existe-t-il des consommateurs potentiels à proximité de la centrale, ou doit-elle être transportée sur une certaine distance ?
- La remise en service de l'installation risque-t-elle d'élever le niveau de la retenue, d'inonder les propriétés riveraines ?
- Quel sera son impact sur l'environnement, par exemple en raison de la diminution du débit dans le tronçon court-circuité ? La remise en état de l'installation peut-elle apporter un plus du point de vue environnemental par rapport à la situation actuelle (création d'un dispositif de franchissement pour les poissons,...) ?

En fonction des résultats de cette pré-étude, nous déciderons de poursuivre ou, au contraire, d'abandonner notre projet.

2. L'étude de faisabilité :

Cette deuxième étape nous permet d'affiner nos choix et d'obtenir des éléments objectifs quant à la viabilité du projet :

a. L'étude détaillée des solutions :

En fonction des caractéristiques du site (limites imposées par le droit d'eau, débit disponible, chute, possibilités d'intégration,...) nous affinons le choix du moteur hydraulique et nous faisons établir des devis pour différentes options. N'hésitons pas à nous informer sur les possibilités de réfection du moteur hydraulique existant, si son état et ses performances rendent cette solution pertinente.

Si le moteur hydraulique doit être remplacé, il est souvent intéressant, afin de minimiser les interventions, de conserver le même type de machine : une roue à aubes obsolète sera avantageusement remplacée par une roue moderne, une turbine vétuste par une nouvelle turbine.

A partir des caractéristiques des machines proposées, nous pourrons comparer leurs productions d'énergie respectives, par exemple à l'aide du classeur Excel « Calcul hydro ».

De même :

- nous ferons établir un diagnostic détaillé de l'état de l'ensemble des ouvrages, ainsi que les devis concernant les actions correctives à mener ;
- nous évaluons le niveau des sédiments dans la retenue d'eau. Si leur quantité impose une extraction, ces sédiments seront analysés et le coût de leur extraction estimé ;
- si l'installation doit être raccordée au réseau, nous demanderons une étude préalable permettant au Gestionnaire du Réseau de Distribution d'évaluer les contraintes liées au raccordement de l'installation sur le réseau.

A partir de ces différents éléments, nous pourrons évaluer la rentabilité financière des différentes options envisagées.

b. La concertation :

Une fois que les grandes lignes de notre projet sont définies, il est capital de nous mettre en relation avec les principaux acteurs du milieu aquatique, en particulier avec la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF) et l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), qui assurent la Police de l'eau, afin de recueillir leur avis, leurs suggestions et leurs commentaires. Ces organismes vérifieront bien entendu que notre projet est conforme à l'ensemble de la réglementation relative au milieu aquatique. Entreprendre cette démarche tant que le projet n'en est qu'à sa phase « papier » pourra nous éviter de cruelles et coûteuses déconvenues !

Nous prendrons également contact avec les riverains, avec l'Association de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique (APPMA) locale et avec le Syndicat gérant le cours d'eau. Ils pourront nous faire part de leurs réserves, attirer notre attention sur certains points critiques (mauvais état des ouvrages, risques d'inondation ...) auxquels nous devons remédier. Cette démarche pourra également nous orienter vers des solutions que nous n'avions pas considérées jusqu'alors.

En fonction de ces différents retours, il nous sera possible de revoir certaines solutions, et d'éliminer celles qui sont incompatibles avec une véritable démarche de développement durable.

Au terme de cette 2^e étape, nous déciderons, en fonction des résultats de nos recherches, de poursuivre ou d'abandonner notre projet.

3. La finalisation du projet :

Au cours de cette ultime étape précédant la phase pratique, il nous restera à :

- finaliser notre choix, en retenant la solution la plus satisfaisante ;
- fixer le budget et assurer le financement du projet ;
- accomplir, si nécessaire, les formalités relatives aux règles d'urbanisme, en fonction de la nature des travaux (réfection du bâtiment du moulin, modification de son aspect extérieur,...) ;
- entamer les démarches en vue du raccordement de l'installation au réseau et de la vente de l'énergie, si telle est sa destination.

XVII. Dossier 1 : Le Moulin de Saint Yves (56).

I. La situation :

Le moulin de St Yves est établi sur le Scorff, un fleuve côtier breton qui se jette dans l'Atlantique au niveau de la ville de Lorient.

Il est situé à une douzaine de kilomètres de l'embouchure du cours d'eau, à cheval sur les communes de Pont-Scorff et de Cléguer, dans le département du Morbihan.

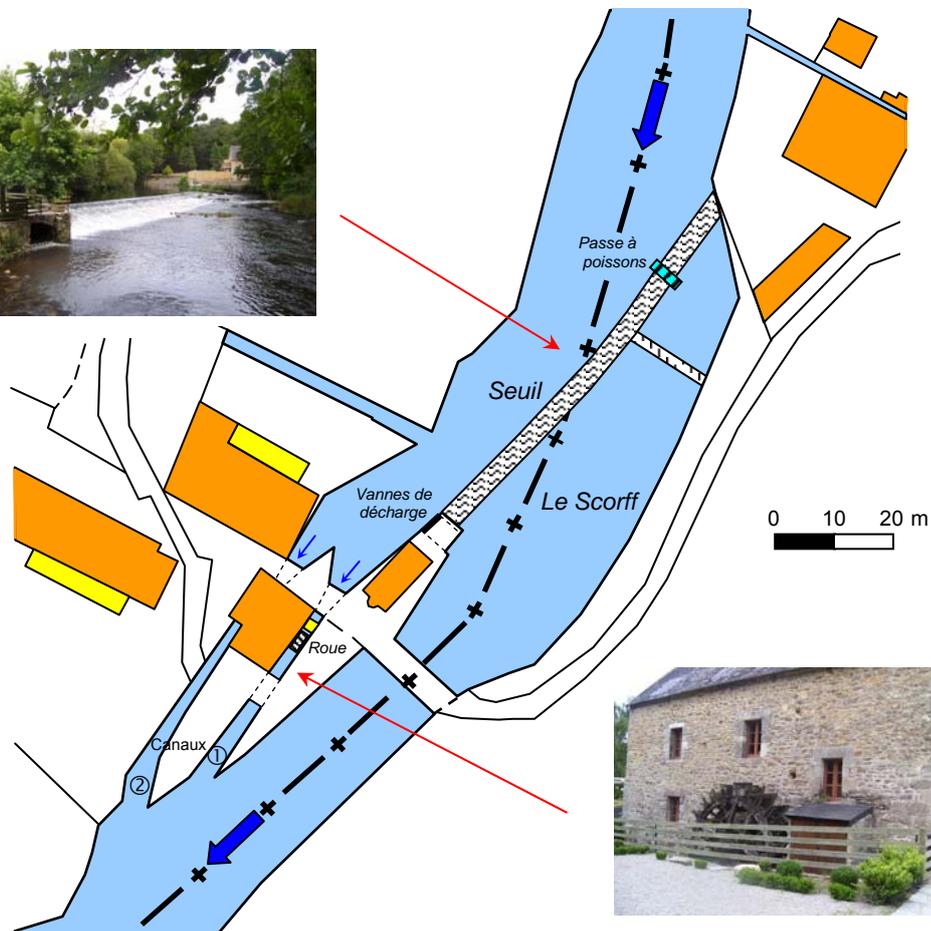
Le Scorff est réputé à juste titre pour la qualité de ses eaux et pour la diversité de son peuplement piscicole. Parmi ses habitants, le saumon atlantique fait l'objet de toute l'attention de l'INRA et de la Fédération Départementale de la Pêche.

Ce cours d'eau est classé au titre du franchissement des espèces migratrices, dont le saumon, la truite de mer, la truite fario, l'anguille, l'alose et la lamproie marine. Par conséquent, tout ouvrage hydraulique établi sur le Scorff doit être muni d'un dispositif de franchissement adéquat.

Enfin, du fait de sa forte valeur écologique, la vallée du Scorff est intégrée au réseau *Natura 2000*.

Le moulin de St Yves, construit en 1669, est « fondé en titre » ; il fut réglementé en 1889, à l'occasion de la création, sur le site, d'une brasserie utilisant la force motrice de l'eau, puis il demeura en activité jusqu'en 1971. Actuellement, ses bâtiments abritent un restaurant renommé tenu par la famille Le Bail, propriétaire des lieux depuis 1876.

Les ouvrages hydrauliques du moulin sont organisés autour d'un seuil de section triangulaire, long de 70 m et muni de 3 vannes de décharge, d'une largeur totale de 2 m. Il est pourvu d'une passe à poissons à ralentisseurs, associée à un prébarrage.



La retenue d'eau alimente deux biefs ou canaux de dérivation :

- Le canal ① est pourvu d'une roue à aubes en dessous, de 4 m de diamètre, en mauvais état.

A l'origine, ce bief, qui amenait l'eau à 2 roues, avait une largeur de 1,55 m. Il a été rétréci ultérieurement à 1 m pour permettre l'utilisation de la roue actuelle. Le rétrécissement est bien visible sur la photo ci-contre.

- Le canal ② passe par le bâtiment du moulin ; il ne permet plus l'utilisation de la force motrice de l'eau.



II. L'état des lieux :

Points forts :

- Le seuil est en bon état ; il est muni d'une passe à poissons.
- L'ensemble du site est parfaitement aménagé et les locaux sont rénovés.
- Le site est facilement accessible et raccordé au réseau électrique public Basse Tension.
- La consommation d'énergie sur le site même est importante (9 600 kWh/mois !), du fait de l'activité de l'établissement. L'énergie produite sera en priorité consommée sur place.

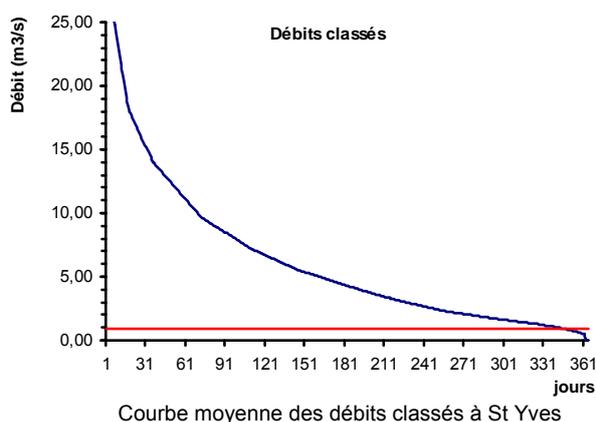
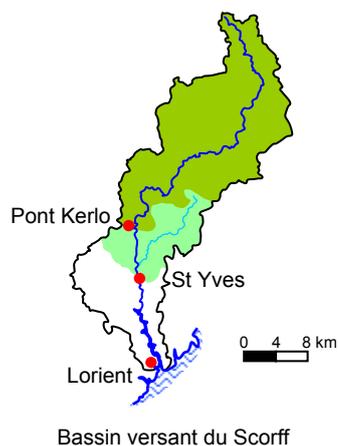
Contraintes :

- Les bâtiments étant rénovés et le site aménagé, les travaux de génie civil devront être limités.
- Le bâtiment du moulin sert de salle de restauration et abrite toujours l'ancien mécanisme de meunerie. Il ne pourra donc pas accueillir les équipements de la future installation.
- La station de pompage de Keréven, qui alimente en eau potable une partie de la région lorientaise, est située à 750 m en amont du moulin. Elle prélève un débit horaire de 1050 m^3 , soit $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$, qui devra être déduit du débit disponible du cours d'eau.
- Afin de ne pas perturber le fonctionnement de la passe à poissons et de la station de pompage, le niveau de la retenue ne devra jamais s'abaisser en dessous de la crête du seuil.
- La future installation ne devra pas accroître l'impact de l'aménagement sur la faune aquatique.

III. Le potentiel du site :

- Le débit du Scorff est relevé depuis 1958 par la station de jaugeage de Pont Kerlo, située à 8 kilomètres en amont du moulin.

Avec le ruisseau du Saint Sauveur, le fleuve compte un affluent important entre la station de mesure et le moulin ; pour être réellement représentatives du débit au niveau de St Yves, les données fournies par la station devront donc être corrigées. Etant donné les deux sites sont proches et que les caractéristiques du bassin versant n'évoluent pas de manière significative, cette correction pourra être effectuée au prorata des superficies du bassin versant.



La superficie du bassin versant, en amont de la station de jaugeage de Pont Kerlo, vaut 300 km² (■). Celle en amont de St Yves est égale à 380 km² (■+■).

Au Moulin de St Yves, le débit du Scorff pourra donc être estimé égal à celui mesuré par la station de jaugeage, multiplié par le rapport des superficies du bassin versant, soit $380/300 = 1,26$.

Le module du cours d'eau à Pont Kerlo vaut 5,02 m³/s. Au niveau de St Yves, il pourra donc être évalué à $1,26 \times 5,02 = 6,32$ m³/s.

Le débit réservé, fixé au 1/10^e du module, vaudra 0,632 m³/s. Le débit prélevé par la station de pompage de Kereven (0,3 m³/s) devra être déduit du débit exploitable.

Le droit d'eau limite le débit exploitable à la valeur pouvant être canalisée par les deux biefs.

- La hauteur de chute brute moyenne vaut 1,45 m.

IV. Les opérations envisagées :

1. Le seuil :

Du fait du bon état général de cet ouvrage, aucune intervention immédiate ne s'impose.

Par ailleurs, en raison de l'occupation permanente du site et du rôle mineur joué par les vannes de décharge sur le contrôle de l'écoulement, l'automatisation de ces dernières n'est pas nécessaire.

Seul le curage de la retenue, fortement envasée, est indispensable avant la remise en service de l'aménagement. Le coût de l'extraction et de l'évacuation des sédiments, par une entreprise locale, est estimé à 2 500 € TTC.

Les interventions ultérieures se limiteront à une visite bisannuelle du seuil, en période d'étiage, et à une inspection systématique après chaque crue importante ; ces visites permettront de détecter puis de corriger au plus tôt toute amorce de dégradation de l'ouvrage.

2. Le Moulin :

Afin de minimiser les transformations du site, nous choisirons d'implanter le moteur hydraulique dans le canal ①. Etant donné que les bâtiments, les lieux et le cours d'eau ne seront pas affectés par ces travaux, ceux-ci ne nécessiteront aucune déclaration.

Le débit du Scorff est abondant et le droit d'eau permet d'exploiter celui attribué à l'ensemble des deux biefs. Par conséquent, le débit utilisable par le moteur hydraulique sera essentiellement limité par la section de son canal d'alimentation. Afin de maximiser l'écoulement, et donc la production de l'installation, le canal ① sera ramené à sa largeur d'origine, de 1,55 m.

La réfection du canal, comprenant l'élimination de son rétrécissement, le jointoiement de ses parois verticales et l'agencement du fond, par une entreprise locale, peut être évaluée à 3 000 € TTC. Durant cette opération, l'extrémité aval du canal sera obturée, par exemple au moyen de bottes de paille, pour éviter toute pollution du Scorff par les résidus de bétonnage.

Etant donné que le site se prête aussi bien à l'installation d'une turbine que d'une roue à aubes ou d'une vis hydrodynamique, nous analyserons successivement chacune de ces possibilités.

La production annuelle de chaque solution sera estimée à l'aide du classeur Excel « Calcul hydro ». Le temps de retour statique sur investissement, qui tiendra compte du curage de la retenue et de la réfection du canal, sera calculé sur la base d'un prix d'achat de l'électricité de 8,57 c€/kWh.

a. Turbine Kaplan :

Le site pourrait être équipé d'une turbine Kaplan à écoulement axial, en S. Le fabricant consulté indique qu'un groupe adéquat développerait une puissance électrique nominale de 19 kW pour un débit maximal de 1,8 m³/s, mais il précise également qu'il n'a encore jamais fabriqué de machine pour une chute aussi basse !

Compte tenu du profil du cours d'eau, cette turbine exploiterait son débit maximal durant les deux tiers de l'année ; une machine à simple réglage conviendra donc parfaitement.

Cette turbine, d'une masse de 6 à 8 tonnes, revient à 100 000 €. La protection de sa prise d'eau sera assurée par une grille dont les barreaux ne pourront être écartés de plus de 8 mm, l'administration imposant cette limite sur le Scorff, afin d'éviter aux poissons un passage fatal par la turbine. En raison de la finesse de la grille, l'usage d'un dégrilleur automatique sera indispensable pour éviter le colmatage de cette dernière par les débris flottants

Le montant total du système comprenant les équipements tels que le multiplicateur de vitesse à poulies-courroie, la génératrice, l'armoire électrique, la vanne de garde, et incluant les frais de transport et de montage, peut être estimé à 140 000 € HT, soit à 167 440 € TTC.

Au cours d'une année moyenne, l'installation fonctionnerait durant 312 jours, dont 238 à pleine puissance, et produirait 122 000 kWh. Son temps de retour sur investissement serait de 16,5 ans.

Remarque : en raison de la constance du débit exploitable, une hélice à pas fixe et à distributeur réglable - indispensable pour contrôler le niveau de la retenue d'eau - permettrait de réduire quelque peu le coût sans trop pénaliser la production. Aucune proposition concernant ce type de machine n'a cependant été reçue à ce jour. Il est à noter que le laboratoire suisse MhyLab s'est récemment lancé dans la conception de ce type de machine destinée aux très basses chutes.

b. Roues à aubes :

Une roue à aubes s'intègre facilement dans le canal, prévu pour ce type de machine.

La roue en dessous existante, qui présente un mauvais rendement ($\approx 25\%$) du fait même de son principe de fonctionnement, sera avantageusement remplacée par une roue de côté moderne.

- La société allemande **Hydrowatt** propose deux variantes basées sur des roues Zuppinger. Chaque ensemble comprend la roue, le multiplicateur de vitesse, la génératrice, la vanne de réglage du débit, la grille de protection et l'armoire électrique. Le coût indiqué inclut le montage du système.

	Variante 1	Variante 2
Puissance élec. nominale	10 kW	17 kW
Débit nominal	1,2 m ³ /s	1,8 m ³ /s
Dimensions	Ø 4 m, largeur 1,40 m	Ø 6,5 m, largeur 1,40 m
Masse totale	8 à 10 tonnes	13 à 15 tonnes
Coût HT	60 à 70 000 €	100 à 120 000 €
Coût TTC (TVA 19,6%)	71 760 à 83 720 €	119 600 à 143 520 €

Production moy. annuelle	73 500 kWh	114 000 kWh
Nb. de jours de fct.	336	331
Temps de retour	14 ans maxi.	13 à 15 ans maxi.

- L'ingénieur **M. Fonfrède** propose un groupe d'une puissance électrique nominale de 16 kW, muni d'une roue de côté de sa conception. Cette roue, qui exploite un débit nominal de 1,7 m³/s, présente un diamètre de 3 m et une masse de 2500 kg.

Les coûts se répartissent comme suit :

Roue en acier inoxydable :	34 000 €.
Multiplicateur de vitesse à engrenages, et accouplements :	10 945 €.
Génératrice asynchrone de 17 kW, 400 V, 6 pôles :	1 250 €.
Vanne de réglage du débit et de coupure :	6 850 €.
Armoire électrique :	7 500 €.
Transport et Montage :	6 500 €.
Grille de protection, d'écartement 10 cm (en sus de la proposition) :	900 €.
Total HT :	67 945 €.

Total TTC (TVA 19,6%) : 81 262 €.

Au cours d'une année moyenne, sa production avoisinerait 106 000 kWh, l'installation fonctionnant durant 332 jours, dont 240 à pleine puissance. Son temps de retour sur investissement serait de 9,5 ans.

c. Vis hydrodynamique :

La société **Ritz-Atro** propose un groupe d'une puissance électrique nominale de 5,72 kW. Il est construit autour d'une vis hydrodynamique pouvant exploiter un débit maximal de 0,64 m³/s, sous une chute de 1,50 m, avec un rendement maximal de 80 %. Cette machine présente un diamètre de 1,33 m, une longueur de 3,73 m et une masse 3000 kg.

Le détail des coûts est le suivant :

Vis et auge, en acier traité anti-corrosion :	19 900 €.
Multiplicateur de vitesse et frein :	5 659 €.
Génératrice asynchrone de 7,5 kW, 400 V, 4 pôles :	461 €.
Armoire électrique :	7 428 €.
Vanne de garde et grille de protection :	6 383 €.
Transport et montage :	21 637 €.
Total HT :	61 468 €.
Total TTC (TVA 19,6%) :	73 516 €.

Au cours d'une année moyenne, cette vis fonctionnerait durant 340 jours, dont la plupart à pleine puissance, et produirait 47 000 kWh. Son temps de retour sur investissement serait de 19,5 ans !

3. En résumé...

- La turbine permet de maximiser la production du site, mais en raison de la faible hauteur de la chute, sa masse est importante, son coût élevé et son temps de retour sur investissement relativement long. De plus, l'entrée de cette machine imposante et complexe doit être munie d'une grille de protection de faible écartement, indissociable d'un dégrilleur automatique, tous deux inutiles avec les solutions alternatives. Enfin, son esthétique ne sera pas forcément en harmonie avec celle du site.
- La vis hydrodynamique est fortement pénalisée par la contrainte de ne pas modifier les dimensions du bief et de la prise d'eau : en raison du diamètre réduit imposé par la taille de ces ouvrages, le débit et la puissance au point nominal restent faibles par rapport à ceux des autres solutions. Un canal élargi à 2,40 m permettrait la mise en œuvre une vis capable d'exploiter un débit comparable à celui des autres solutions. Par exemple, son fabricant a également proposé une vis d'un diamètre de 3 m, développant une puissance électrique nominale de 40 kW pour un débit de 4,1 m³/s. L'investissement, de 146 000 € TTC, serait rentabilisé en moins de 10 ans.
L'absence de contrôle de l'écoulement exploité par la vis entraînerait toutefois des variations du niveau de la retenue, en fonction du débit disponible. Ainsi, par faible débit, la hauteur de la chute serait réduite de manière significative. A titre d'exemple, avec la machine de 40 kW évoquée ci-dessus, cette hauteur passerait de 1,45 m, au débit nominal, à 40 cm, au débit minimal. Par ailleurs, ces variations perturberaient le fonctionnement de la passe à poissons intégrée au seuil, voire celui de la station de pompage située en amont de l'aménagement.
- La 2^e variante de la roue Zuppinger assure une production importante, proche de celle de la turbine. De plus, son esthétique (voir page 35) mettrait bien le site en valeur. Son encombrement et sa masse sont cependant très importants, et son coût élevé.
- La roue Fonfrede, conçue dans le but de remettre en valeur les anciens moulins, représente le meilleur compromis et permettrait d'exploiter rationnellement ce site. Sa production annuelle est élevée, son coût et son temps de retour sur investissement sont tout à fait acceptables. De plus, comme son encombrement et sa masse sont bien inférieurs à ceux des autres solutions, une analyse du cycle de vie devrait également lui être favorable.

4. La mise en œuvre :

Afin d'assurer l'échappement optimal de l'eau à la sortie de la roue et d'éviter d'attirer les poissons migrateurs dans le canal de dérivation qui constituerait pour eux un cul de sac, il serait souhaitable d'implanter la roue Fonfrède à l'extrémité aval du bief, au plus près de son point de restitution.

Cependant, cette disposition idéale ne peut être adoptée au Moulin de St Yves en raison de la pente du terrain qui imposerait de rehausser les parois du bief. La roue sera donc implantée en aval de la roue actuelle, près du pont enjambant le canal ①. Le multiplicateur de vitesse et la génératrice prendront place en plein air, à côté de la roue.

Des pierres disposées dans le cours d'eau ralentiront la vitesse de l'écoulement à sa sortie du canal de dérivation, afin d'éviter que le courant n'attire les poissons dans cet ouvrage. Leur disposition et l'application de mesures complémentaires devront être définies en lien avec l'ONEMA et la Fédération Départementale de la Pêche.

Enfin, le fonctionnement d'une roue à aubes, tout comme celui de nombreux dispositifs mécaniques, génère des risques évidents (choc, entraînement, écrasement,...) pour les personnes qui pourraient entrer en contact avec les pièces en mouvement. Ces risques seront supprimés, conformément aux normes en vigueur (NF EN 924,...), par la mise en place de barrières interdisant l'accès de la machine au personnel ainsi qu'aux clients de l'établissement.

5. Remarque importante :

Cette étude comparative repose sur le choix de minimiser les interventions sur le site, et donc de ne modifier ni le canal ①, ni sa prise d'eau. Cette option ne permet toutefois pas de profiter de la totalité du débit alloué par le droit d'eau.

L'autre alternative, consistant à exploiter la totalité du débit légal, permettrait de maximiser la puissance et la production de l'installation, qui pourraient être quasiment doublées par rapport aux calculs précédents. Son application entraînerait cependant d'importants travaux d'élargissement du canal de dérivation, afin de lui permettre de véhiculer le débit initialement attribué aux 2 biefs. Cette transformation modifierait considérablement l'aspect des lieux, nécessiterait l'accord de la DDAF et ne répondrait sans doute pas aux souhaits des propriétaires...

V. Conclusion :

La mise en œuvre d'une roue Fonfrède permettrait au Moulin de St Yves de profiter à nouveau, et à un prix raisonnable, de son infrastructure hydraulique et de la ressource que le Scorff met gratuitement à sa disposition. Cet investissement, rentabilisé en moins de 10 ans, redonnerait à l'aménagement une finalité tout à fait en accord avec les besoins contemporains du site.

La production moyenne annuelle, de l'ordre de 106 000 kWh, couvrirait ainsi plus de 90 % de la consommation d'électricité du restaurant du Moulin de St Yves (115 200 kWh¹). Non seulement, l'installation hydroélectrique réduirait considérablement la facture énergétique de cet établissement, mais elle éviterait également un rejet annuel d'au moins 79 tonnes de CO₂².

Par ailleurs, une telle installation mettrait le site en valeur, attirerait vraisemblablement des convives potentiels et renforcerait l'image positive de l'établissement auprès de sa clientèle. Elle constituerait de ce fait un excellent investissement, témoignant de la volonté de ses propriétaires de s'engager dans une démarche de développement durable.

¹ Un audit détaillé de cette consommation serait souhaitable. Des économies substantielles devraient être possibles.

² Calculé sur la base de 750 kg de CO₂ pour 1000 kWh, l'électricité consommée en Bretagne étant principalement produite à partir d'énergies fossiles.

Dossier 2 : La Microcentrale Voelckel, à Steinbourg (67).

I. La situation :

Cette microcentrale est établie sur la Zorn, un affluent indirect du Rhin. Elle est située sur la commune de Steinbourg, à 5 km en aval de la ville de Saverne, dans le département du Bas Rhin.

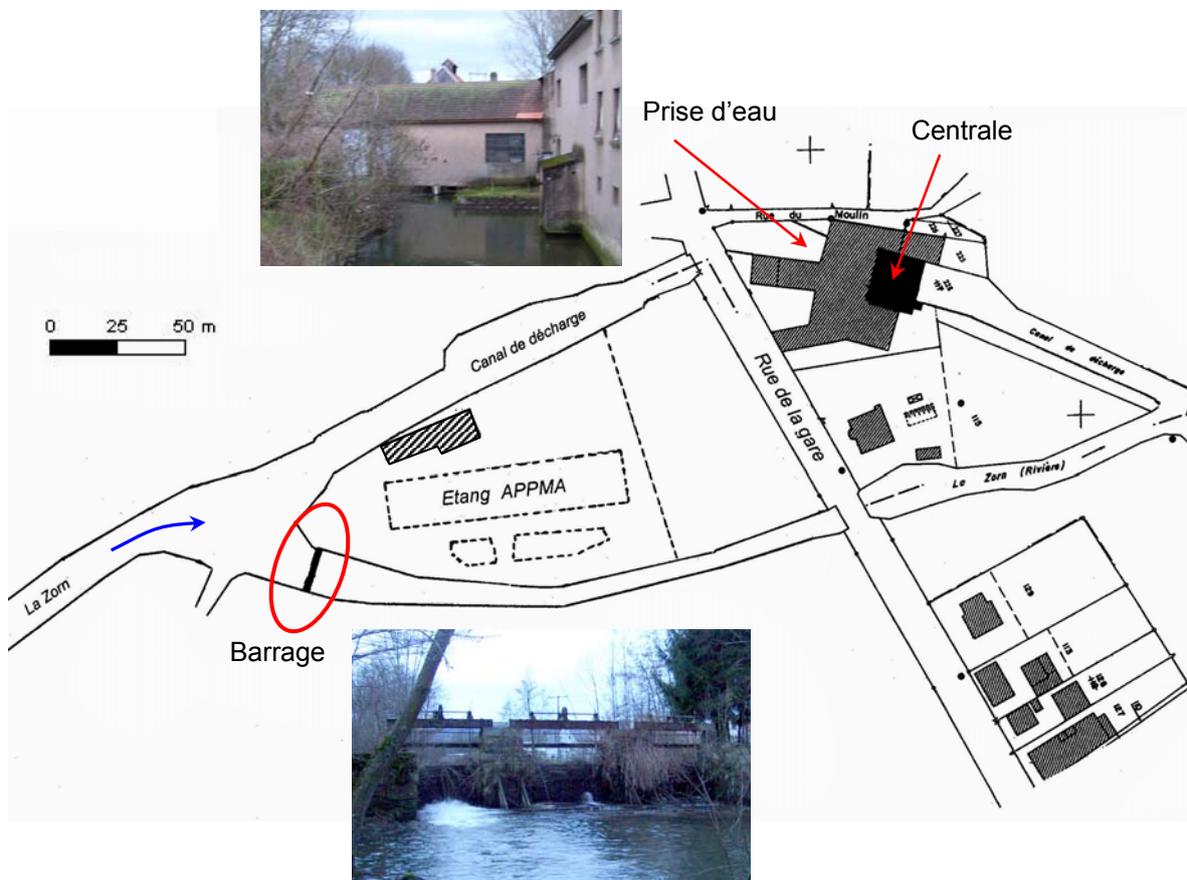
La centrale, bâtie sur l'emplacement d'un ancien moulin figurant dans de nombreux documents d'archives datant d'avant 1789, est « fondée en titre ».

Elle dispose par ailleurs d'un règlement d'eau qui lui accorde un débit de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$, pour une hauteur de chute de 2,50 m.

Comme l'ensemble des cours d'eau du bassin du Rhin, la Zorn est classée au titre du franchissement des poissons migrateurs. Cependant, comme aucune liste d'espèces migratrices n'a été publiée à ce jour pour ce cours d'eau, l'aménagement ne comporte pas de passe à poissons, non obligatoire.

La centrale est en fait implantée sur un canal de dérivation de la Zorn, appelé canal de décharge sur le plan cadastral (voir ci-dessous). Il est alimenté par une retenue créée par un barrage mobile situé à 200 m en amont de la centrale. Cet ouvrage comporte 3 vannes verticales en bois, à commande manuelle, portées par des piliers maçonnés en pierres de taille.

La microcentrale est équipée de deux turbines Francis en chambre d'eau, datant de 1949, dont les puissances nominales valent respectivement 25 et 40 kW. Deux vannes de décharge à commande automatique contrôlent le niveau du canal au voisinage de la prise d'eau. Cette dernière alimente les chambres d'eau par une galerie couverte longue de 25 m.



Jusqu'au début des années 80, cette installation alimentait en électricité la clouterie qui occupe encore de nos jours les locaux attenants à la centrale.

II. L'état des lieux :

Points forts :

- Le bâtiment de la centrale est en bon état ; tous ses plans, qui datent de sa reconstruction, en 1950, sont disponibles.
- Les deux turbines sont en bon état. Elles ne présentent que quelques traces de corrosion. Par ailleurs, toutes leurs caractéristiques sont parfaitement connues.
- La centrale est située au cœur même du village de Steinbourg. Elle est donc parfaitement accessible, et l'électricité qu'elle pourra produire sera consommée dans le quartier même, ce qui minimisera les pertes en ligne.
- La salle des turbines est vaste (157 m²) et abrite un grand nombre d'équipements électriques anciens (armoires électriques, groupe électrogène,...). Elle serait parfaitement apte à servir de salle d'exposition sur l'énergie hydraulique.

Points faibles :

Le barrage constitue le principal point faible de l'aménagement ; il est fortement dégradé, en raison d'un manque évident d'entretien :

- Le jointoiment des piliers supportant les vannes a disparu et une abondante végétation arbustive développe ses racines dans les interstices. Par contre, le seuil et le radier de l'ouvrage sont en bon état et ne présentent pas de trace de sous-cavage.
- Les supports des mécanismes de commande des vannes sont fortement corrodés. Par ailleurs, en raison du rôle important joué par cet ouvrage dans le contrôle de l'écoulement de l'eau, la commande manuelle, qui requiert une intervention humaine en cas de variation importante du débit de la rivière, n'est guère satisfaisante.
- Le barrage, d'une hauteur de 1,80m, ne comporte pas de dispositif de franchissement. Il constitue de ce fait un obstacle infranchissable pour la population piscicole.
- La retenue d'eau est fortement envasée.

Enfin, la prise d'eau de la centrale ne comporte pas de dégrilleur.

Contrainte :

- La retenue d'eau alimente l'étang de l'APPMA locale, qui prélève un débit d'environ 0,1 m³/s.

III. Le potentiel du site :

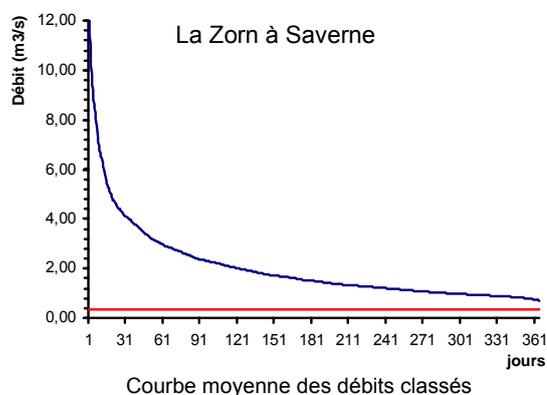
- La station de jaugeage de Saverne est située à 7 kilomètres en amont de l'aménagement. Etant donné que le cours d'eau ne comporte pas d'affluent majeur entre la centrale et la station de jaugeage, les mesures de débit fournies par cette dernière seront exploitées sans correction.

Par ailleurs, comme la Zorn quitte le Massif Vosgien en aval de cette station et que les principales caractéristiques du bassin versant y changent radicalement, une correction pertinente serait difficile à établir.

Le module du cours d'eau vaut : 2,27 m³/s.

Le débit réservé est égal au 1/10^e du module, soit 0,227 m³/s. Le débit prélevé par l'étang de pêche (0,1m³/s) devra être déduit du débit exploitable.

- La hauteur de chute brute vaut 2,50 m



IV. Les opérations envisagées :

1. Le barrage :

Le barrage mobile joue un rôle capital dans le contrôle du niveau de la retenue d'eau. En raison de sa vétusté et de l'absence de commande automatique, sa réfection est prioritaire, de même que le curage du plan d'eau, fortement envasé.

Cette opération comprend les actions suivantes (coûts HT) :

- L'extraction et l'évacuation des sédiments, par une entreprise locale : ≈ 3 000 €.
- La réfection, à sec, des 4 piliers, par une entreprise spécialisée : ≈ 8 000 €.
- Le remplacement des 3 vannes (largeur 3,20 m et 3,90 m ; hauteur 1,80 m) et leur automatisation : 3 x 14 500 €.

Par ailleurs, à l'occasion de cette rénovation, l'ouvrage serait muni d'une passe à poissons. Celle-ci sera de préférence implantée sur la rive gauche de la Zorn (du côté des étangs). Ce terrain, qui appartient à la commune, est géré par l'APPMA locale, ce qui devrait simplifier une prise de décision en faveur de la construction de ce dispositif. Une passe à bassins successifs semble la mieux adaptée au site. Ses principales caractéristiques pourront être définies par l'ONEMA, en fonction du peuplement piscicole du cours d'eau. Son coût avoisinerait 30 000 €.

Ainsi, le montant de la réfection du barrage s'élèverait à 84 500 € HT, c'est-à-dire à 101 060 € TTC.

2. La centrale :

Comme la configuration des lieux ne se prête ni à l'installation d'une roue à aubes, ni à celle d'une vis hydrodynamique, nous disposons des alternatives suivantes :

- Changer toute la chaîne de conversion de l'énergie et, en particulier, remplacer les anciennes turbines Francis, de rendement modeste et mal adaptées à l'exploitation des faibles débits, par une turbine Kaplan moderne.
- Remettre en service les turbines Francis existantes, après leur révision et le remplacement complet de l'équipement électrique (génératrices et tableaux).

a. Option 1 : remplacement des turbines existantes :

Cette option présente l'avantage de doter l'aménagement d'un équipement neuf, permettant de tirer le meilleur parti de la ressource. Par contre, son coût et l'ampleur des travaux (démontage des anciennes turbines, adaptation de la chambre d'eau, implantation de la nouvelle machine) seront nettement supérieurs à ceux de la seconde solution.

- L'entreprise allemande Ossberger propose un groupe d'une puissance électrique nominale de 50 kW, muni d'une turbine à flux traversant, au lieu d'une turbine Kaplan. Le fabricant justifie sa proposition par la simplicité et le prix réduit de ce type de machine. Celle-ci prendrait place dans la chambre d'eau existante, maintenue à sec.

La turbine développerait sa puissance mécanique nominale de 56,5 kW pour un débit de 3 m³/s, la génératrice délivrant 50 kW.

L'ensemble comprenant la turbine, le multiplicateur de vitesse à engrenages, la génératrice, l'armoire électrique, le régulateur de vitesse et la conduite de raccordement de la turbine à l'ouvrage d'amenée, revient à 210 000 €, transport compris.

Les frais de montage pouvant être estimés à 8 000 €, le montant total s'élèverait à 218 000 €. Le devis ne donne que l'enveloppe globale et ne précise aucun détail des coûts.

A titre de comparaison, Ossberger signale qu'une turbine Kaplan de sa fabrication, présentant des caractéristiques similaires, reviendrait à 300 000 €.

Au cours d'une année moyenne, la production, estimée à l'aide du classeur Excel « Calcul hydro », avoisinerait 206 000 kWh, l'installation fonctionnant durant 357 jours, dont 48 à pleine puissance.

- L'entreprise française THEE propose un devis détaillé portant sur un groupe d'une puissance électrique nominale de 43 kW, muni d'une turbine Kaplan à double réglage, à implanter en chambre d'eau.

Les caractéristiques techniques et les coûts hors taxe sont les suivants :

- Turbine de puissance nominale 51,3 kW pour une chute nette de 2,40m et un débit de 2,38 m ³ /s, rendement 86% :	92 400 €.
- Aspirateur coudé :	8 900 €.
- Génératrice asynchrone de 50 kW, 230/400 V, à 6 pôles :	4 400 €.
- Armoire électrique :	31 000 €.
- Grille de protection (5,8 m x 2,5 m, écartement 10 mm) :	6 900 €.
- Dégrilleur automatique :	12 500 €.
- Transport et Montage :	8 500 €.

Le montant total hors taxes de cette solution s'élèverait à 164 600 € et celui TTC, à 196 861 €.

Au cours d'une année moyenne, la production, estimée à l'aide du classeur Excel « Calcul hydro », avoisinerait 206 000 kWh (comme celle du groupe précédent), l'installation fonctionnant durant toute l'année, dont 72 jours à pleine puissance.

b. Option 2 : Remise en service des turbines existantes :

Cette option est envisageable du fait du bon état apparent des turbines. Elle présente l'avantage de minimiser les coûts et de redonner une seconde vie au matériel existant.

En raison du rendement modeste de ces turbines ($\approx 77\%$) et de leur débit minimal relativement élevé, sa production ne pourra toutefois pas rivaliser avec celle de l'option précédente.

Les moteurs hydrauliques présentent les caractéristiques suivantes :

	Turbine 1	Turbine 2
Puissance mécanique	35 ch / 25 kW	55 ch / 40kW
Débit nominal	1,35 m ³ /s	2,2 m ³ /s
Vitesse de rotation	166 tr/min	125 tr/min

D'après la courbe des débits classés, le fonctionnement simultané des deux turbines, en vue de l'exploitation des débits compris entre 2,2 et 3,5 m³/s, ne serait possible que durant une trentaine de jours par an. Par conséquent, nous nous contenterons de faire fonctionner ces machines séparément, en fonction du débit disponible, selon le tableau ci-dessous :

Débit dispo. (m ³ /s)	Q < 0,55	0,55 ≤ Q ≤ 1,35	Q > 1,35
Turbine en service	Aucune	Turbine 1	Turbine 2

Par ce choix, la centrale bénéficiera d'un raccordement au réseau d'une puissance inférieure à 36 kVA, dont les formalités sont plus simples et les redevances de comptage plus faibles que celles d'un raccordement de puissance supérieure à cette limite.

Chaque turbine entraînera une génératrice asynchrone de puissance adéquate, par l'intermédiaire d'un multiplicateur à poulies – courroie plate.

La mise en œuvre de cette solution impliquera les opérations suivantes (prix du matériel : HT) :

- La révision approfondie des turbines, afin de s'assurer du bon état de leur aubage et de leurs paliers.
- La suppression des régulateurs de vitesse hydromécaniques commandant les distributeurs des deux turbines, et leur remplacement par des servomoteurs électriques pilotés par l'automate de la centrale
- La suppression du renvoi d'angle de chaque turbine, rendu inutile par la nouvelle disposition des génératrices, montées verticalement, parallèlement à l'axe des turbines. Par contre la poulie équipant ce dispositif sera conservée et montée sur l'arbre de la turbine, à la place de l'actuel pignon conique. Elle jouera le rôle de poulie motrice dans le multiplicateur de vitesse transmettant le mouvement à la génératrice.
- Le montage des génératrices asynchrones (une machine de 22 kW, 400 V, 6 pôles, à 2 962 € pour la turbine 1 ; une de 37 kW, 400 V, 6 pôles, à 3 800 € pour turbine 2) et leur raccordement à la nouvelle armoire électrique (8 000 €).
- L'automatisation de la vanne de garde de chaque chambre d'eau.
- Le remplacement de la grille protégeant la prise d'eau (5,8 m x 2,5 m, écartement 10 mm ; 6 900 €), associée à un dégrilleur automatique (12 500 €).



Système de renvoi d'angle
Notez taille de la poulie motrice,
et, au 1^{er} plan, le régulateur de
vitesse de la turbine

Le montant total de cette réhabilitation, par des entreprises locales, peut être estimé à 50 000 € TTC. L'intervention probable d'une association et d'un établissement universitaire permettrait toutefois de réduire les coûts.

La production moyenne annuelle, estimée à l'aide du classeur Excel « Calcul hydro », avoisinerait 180 000 kWh, l'installation fonctionnant durant 337 jours par an, dont 83 à pleine puissance. Au cours d'une année sèche extrême (ex : 2003), l'installation produirait encore 119 000 kWh et fonctionnerait durant 278 jours.

3. Conclusion :

Une turbine moderne, parfaitement dimensionnée en fonction des spécificités du site, permettrait de maximiser la production de l'installation. Toutefois, le choix d'une turbine à flux traversant est discutable en raison de son coût, comparé à celui d'une turbine Kaplan, et des réserves formulées à la page 32 au sujet de son utilisation en basse chute.

Etant donné que l'indispensable réfection du barrage représente un investissement considérable, que le rapport des coûts est nettement défavorable à l'implantation d'une nouvelle turbine, tandis que l'écart entre la production d'une nouvelle machine et celle des turbines existantes est réduit ($\approx 13\%$), nous opterons pour la remise en service de ces dernières.

Leur production moyenne, 180 000 kWh, vendue intégralement à EDF sur la base de 8,57 c€/kWh, rapporterait annuellement 15 200 €, déduction faite des frais de comptage. Le temps de retour sur investissement de l'installation, compte tenu de la réfection du barrage, serait donc de 10 ans.

Cette installation éviterait un rejet annuel d'au moins 108 tonnes de CO₂³ et satisferait la consommation d'électricité de plus d'une cinquantaine de foyers !

Epilogue :

En dépit du potentiel de la centrale, et malgré les propositions d'aide d'une association et d'un établissement d'enseignement supérieur, ses propriétaires viennent de céder leur droit d'eau à une collectivité territoriale. Celle-ci aura ainsi toute latitude de manœuvre pour mener ses projets visant, sous le prétexte de limiter les inondations, à modifier radicalement le cours de la Zorn !

« Il n'est pire aveugle que celui qui ne veut pas voir ; il n'est pire sourd que celui qui ne veut pas entendre. »

³ Sur la base de 600 kg de CO₂ pour 1000 kWh.

XVIII. Conclusion et perspectives :

En faisant le point sur les différents aspects de la réhabilitation d'un moulin en vue de la production d'électricité, cette étude a permis de rassembler et d'organiser de nombreuses informations indispensables au porteur de projet qui souhaiterait rénover un petit aménagement hydraulique, dans une démarche de développement durable.

Elle devrait également fournir des arguments à opposer aux détracteurs de la petite hydroélectricité, qui lui reprochent de nuire à l'environnement.

Il est maintenant indispensable de faire « vivre » ce guide, c'est-à-dire de l'utiliser pour le confronter à la réalité du terrain, afin de l'améliorer et de le compléter en fonction des retours d'expérience.

Plusieurs points restent cependant à développer ou à approfondir pour rendre l'« outil » pleinement opérationnel :

- Plusieurs fiches complémentaires décrivant des points importants, devront être élaborées. Parmi celles-ci, la description détaillée, photos à l'appui, de la révision complète d'une turbine Francis....
- Le classeur Excel « Calcul Hydro », qui permet d'évaluer la production annuelle d'un aménagement, est opérationnel, mais il serait souhaitable, afin de pouvoir estimer les gains liés à la vente de l'énergie au tarif à deux composantes, d'avoir la possibilité de distinguer les productions hivernale et estivale. De même, afin d'affiner les estimations, il serait nécessaire de lui permettre de prendre en compte l'élévation, en fonction du débit, du niveau en aval des ouvrages.
- Enfin, ce document aurait dû être associé à un outil d'aide à la décision, à l'image de celui du programme Diane, en Suisse¹. Il aurait permis, en fonction du contexte, de la ressource hydraulique et d'un diagnostic effectué sur les ouvrages à l'aide de fiches appropriées, d'évaluer l'opportunité d'une réhabilitation, et même de proposer la ou les solutions les mieux adaptées à chaque situation. Sa conception était initialement prévue dans le cadre de ce travail, mais le temps nécessaire a manqué.

Sur un plan plus général, plusieurs actions complémentaires me paraissent indispensables pour développer la rénovation des anciens aménagements hydrauliques et tendre vers l'objectif évoqué par M. Dambrine, réhabiliter 30 000 moulins en vue de la production d'électricité :

- De nombreux propriétaires ignorent le véritable potentiel de leur moulin, ainsi que les techniques qui permettraient de le remettre en valeur. Au mieux, les ouvrages intéressants sont conservés dans un but purement décoratif (voir Dossier 1) ; au pire, ils sont abandonnés pour être démantelés (voir Dossier 2).

A ce niveau, un vaste programme de communication, qui pourrait être mené par les associations de défense des moulins, me paraît indispensable.

- Bien que la réhabilitation d'un moulin soit généralement rentable à long terme, l'investissement initial est souvent conséquent et peut se révéler dissuasif. Le développement de partenariats avec des établissements de formation ou certaines associations permettrait de réduire les coûts, sans pour autant nuire à la qualité des réalisations.

Là encore, la communication est fondamentale afin que les partenaires potentiels puissent se rencontrer.

- Le temps de retour sur investissement d'une installation hydraulique est d'autant plus long que la puissance nominale de cette dernière est faible. En effet, le coût d'investissement par kW d'une installation de petite puissance est élevé, tandis que sa production annuelle est limitée. Les pouvoirs publics ont reconnu partiellement cette réalité en instaurant, par l'arrêté du 1^{er} mars 2007, une prime sur le tarif d'achat de l'énergie produite par les petites centrales, c'est-à-dire, selon ce texte, celles d'une puissance inférieure à 400 kW !

Pour rendre la réhabilitation des moulins financièrement attractive, cette prime devrait, dans la plage de puissance des moulins, être d'autant plus importante que la puissance de l'installation est faible.

¹ OFEN (CH) Rénover au lieu d'Abandonner – Programme DIANE.

De même, le coût d'investissement par kW d'un aménagement est d'autant plus élevé que la hauteur de la chute est faible ; ce paramètre pourrait également être pris en compte dans la définition de cette prime, comme cela est actuellement envisagé en Suisse.

Cependant, une telle décision est du ressort des pouvoirs publics.

- Bien que dans plusieurs régions, l'administration et certaines collectivités jouent, par leurs conseils et leur niveau d'expertise, un rôle constructif fort apprécié par les porteurs de projets, cette situation n'est pas encore la règle sur l'ensemble du territoire....

Il serait pourtant souhaitable, du fait des enjeux de ces réhabilitations, que des instructions officielles facilitent l'accueil de ces projets, dans les limites de la réglementation en vigueur.

Pour clore ce mémoire sur une note personnelle, je dirais que cette étude fut réellement passionnante en raison de son caractère pluridisciplinaire qui m'a permis d'aborder les nombreux domaines scientifiques et techniques liés aux aménagements hydrauliques, tels que hydrologie, l'étude des moteurs hydrauliques, l'électricité, la mécanique, la vie de la faune aquatique,...

Ainsi, par ces recherches, j'ai pu acquérir ou approfondir de nombreuses connaissances, y compris dans mon domaine de compétence, le génie électrique.

Les investigations menées tous azimuts, jusqu'en Allemagne et en Suisse, m'ont fait rencontrer de nombreuses personnes passionnées par l'hydroélectricité ; toutes m'ont encouragé à persévérer dans mon travail, en insistant sur l'intérêt de ma démarche.

Je regrette simplement qu'aucune des trois études menées sur le terrain (dont une qui ne figure pas dans ce rapport) ne puisse aboutir à la réhabilitation de l'aménagement étudié.

Mais ce n'est que partie remise....

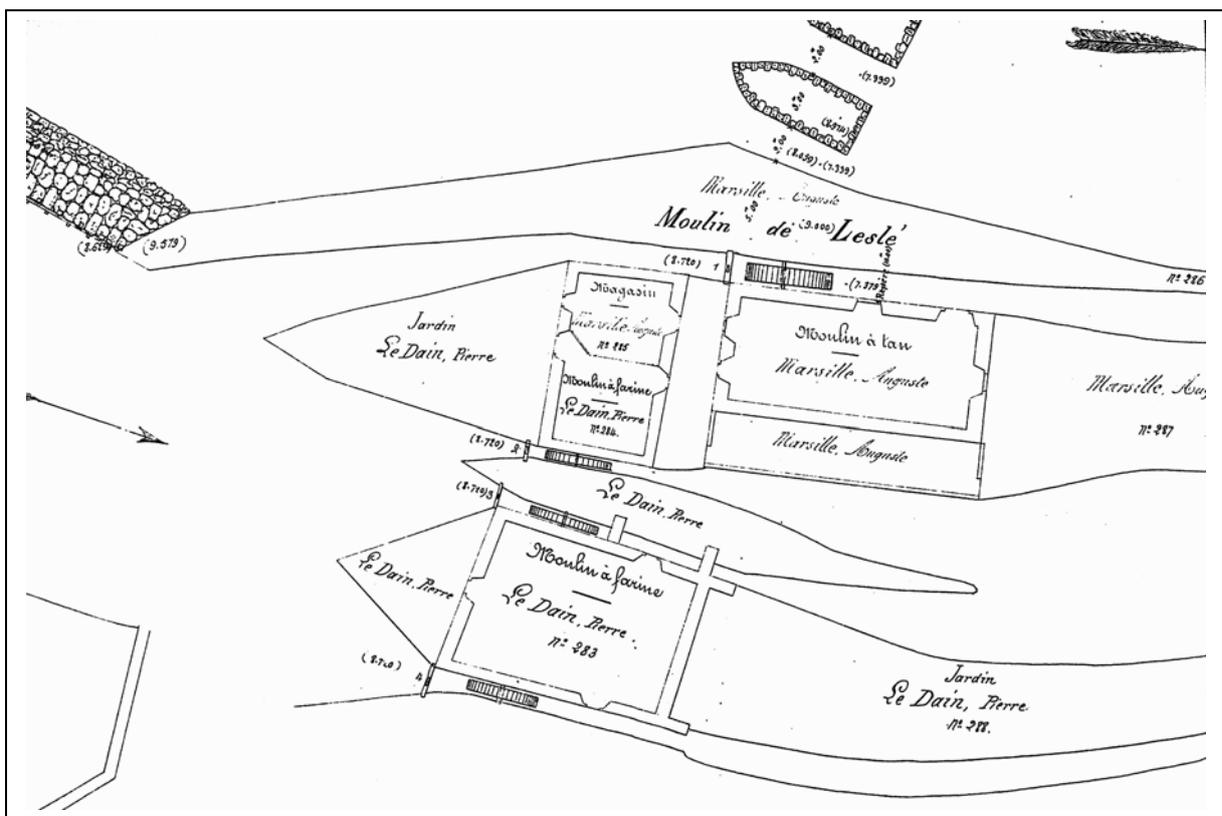
Fiche 1. Indications figurant sur le règlement d'eau :

Outre les droits et les obligations du détenteur du droit d'eau, le règlement d'eau précise :

- Les dimensions du seuil, en particulier sa longueur et la cote de sa crête.
- Le cas échéant, les dimensions des vannes de décharge.
- Les dimensions des vannes motrices (les vannes commandant les canaux des roues).
- L'emplacement et la cote du repère servant de référence de niveau.
- Le niveau maximal atteint lors des crues les plus fortes observées.

Ces informations figurent dans l'arrêté préfectoral ou sur les plans assortis au règlement, tels que le plan général du site, le plan de détail, les plans du vannage....

Exemple : Extraits d'un plan de détail :



Légende :

Les cotes noires entre parenthèses sont les hauteurs des points correspondants.

.....

Les cotes bleues sont celles du plan d'eau relevé le jour de l'opération.

Le plan d'eau des crues extraordinaires est supérieur de 0,880 m au plan d'eau du jour de l'opération.

Les cotes rouges, entre parenthèses, indiquent le niveau de la retenue proposée.

Toutes les cotes de nivellement ont été rapportées à un plan horizontal passant à 10,00 m au dessous de l'appui de la fenêtre percée dans la façade Est du moulin à tan, point pris pour repère provisoire et placé à 1,310 m en contrebas du linteau de la dite fenêtre.

Ouvrages moteurs et régulateurs :

*Barrage ou déversoir : Sa crête est établie à la cote moyenne : 8,629 m.
Il a une longueur de 54,00 m.*

*3 Vannes de décharge : Offrant ensemble une largeur de 2,00 m.
Se levant au dessus du seuil de 1,070 m.
Leur seuil est établi à la cote : 7,950 m.
Leur crête est dérasée à la cote : 8,629 m.*

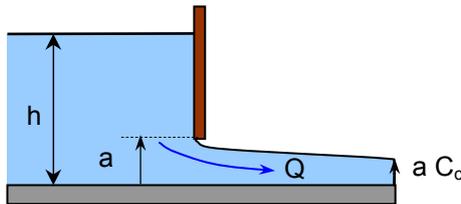
*Vanne motrice N°1 : Le seuil est établi à la cote 8,189 m.
La crête est dérasée à la cote 9,030 m.
Sa largeur est de 1,000 m.
Elle se lève de 0,600 m.*

Vanne motrice N°2 : Le seuil est établi à la cote 7,956 m.

.....

Annexe : Débit s'écoulant par une vanne plane verticale¹.

La vanne est placée dans un canal rectangulaire de largeur **b** et de fond rectiligne quasi horizontal. La vanne est levée d'une hauteur **a**. Le niveau de l'eau en amont de la vanne vaut **h**.



Le débit s'écoulant par la vanne vaut : $Q = C_d a b \sqrt{2gh}$

$$\text{où le coefficient de débit vaut : } C_d = \frac{C_c}{\left[1 + \frac{a C_c}{h}\right]^{\frac{1}{2}}}$$

et le coefficient de contraction de l'écoulement aval : $C_c = \pi/(\pi+2) \approx 0,611$.

Exemple : Cas de la vanne motrice N°1, figurant dans le document ci-dessus.

Son seuil est établi à la cote 8,189 m.

On considère que le niveau de la retenue vaut 8,72 m, valeur donnée par le plan de la page précédente.

Calculons le débit s'écoulant par cette vanne lorsqu'elle est levée de 30 cm :

Niveau amont :	$h = 8,72 - 8,189 = 0,531 \text{ m}$	} $C_d = 0,527 \Leftrightarrow Q = 0,51 \text{ m}^3/\text{s}$
Largeur du canal :	$b = 1 \text{ m}$	
Ouverture de la vanne :	$a = 0,3 \text{ m}$	

¹ D'après R. Sinniger et W. Hager – Traité de Génie Civil de l'EPFL. Vol. 15 – Constructions hydrauliques Ed : P.P.R.

Fiche 2. Mesure du débit :

Les deux méthodes suivantes permettent une mesure approximative du débit d'un cours d'eau.

1. Méthode du flotteur :

Cette méthode doit être appliquée en un endroit où le lit de la rivière est lisse et uniforme sur une certaine longueur. Un flotteur, par exemple une bouteille partiellement remplie, est immergé dans l'écoulement. On mesure le temps t mis par le flotteur pour parcourir une distance connue d . On détermine également la section S du cours d'eau, à l'endroit où la mesure est réalisée.

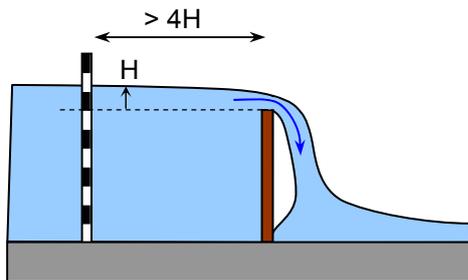
Le débit vaut : $Q \text{ (m}^3/\text{s)} = k \cdot \frac{S \cdot d}{t}$. Le facteur de correction k est compris entre 0,6 et 0,85. ($k = 0,75$ est habituellement retenu).

Cette méthode est simple à mettre en œuvre, mais manque de précision en raison de l'incertitude sur la valeur du coefficient k .

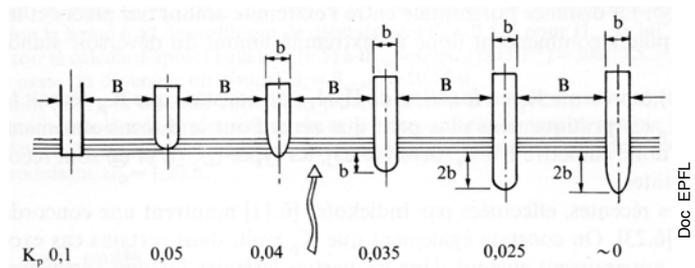
2. Méthode du déversoir :

Sur un aménagement muni d'un déversoir en bon état, il est possible de déterminer la valeur du débit à partir de la mesure la hauteur H de la lame d'eau surversée. Cette mesure doit être effectuée à une distance du déversoir supérieure à $4H$.

- a. Un déversoir à paroi mince permet une mesure **précise** du débit : $Q = C_d B_e H^{3/2} \sqrt{2g}$,
où B_e désigne la largeur efficace de l'ouvrage, et C_d son coefficient de débit : $C_d = 0,42$.



Principe de la méthode du déversoir.



Valeurs de K_p en fonction de la forme des piliers.

Un déversoir de largeur importante est souvent subdivisé par des piliers. La largeur efficace entre 2 piliers vaut alors : $B_e = B - 2 K_p H$, où K_p désigne le coefficient de contraction lié à la géométrie des piliers¹, et B l'intervalle entre 2 piliers.

- b. Le coefficient de débit C_d d'un seuil déversant dépend de sa géométrie et de la hauteur H de la lame d'eau. Les tableaux ci-dessous donnent la valeur **approximative** du débit surversé en fonction de la hauteur H de la lame d'eau, pour une largeur déversoir égale à 1 mètre.

Lame d'eau (m)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
Débit (m ³ /s)	0,02	0,056	0,103	0,158	0,211	0,291	0,366	0,488	0,533	0,626

Lame d'eau (m)	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Débit (m ³ /s)	0,722	0,823	0,930	1,04	1,15	1,265	1,39	1,51	1,64	1,77

D'après THEE

¹ R. Sinniger et W. Hager – Traité de Génie Civil de l'EPFL. Vol. 15 – Constructions hydrauliques.

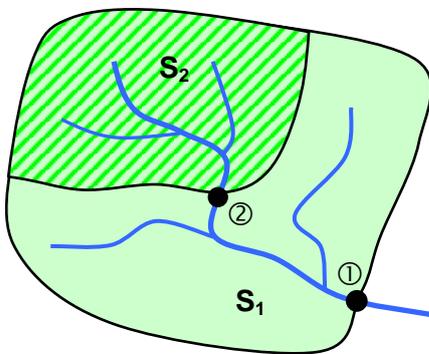
Fiche 3. Calcul du débit :

1. Calcul du débit en un site distant d'une station de jaugeage :

Même lorsque le cours d'eau alimentant l'aménagement à réhabiliter est équipé d'une station de jaugeage, il est rare que cette dernière soit précisément située au voisinage de l'ouvrage considéré. De ce fait, pour obtenir les valeurs et l'évolution du débit réellement représentatives du site à réhabiliter, il sera nécessaire de corriger les données fournies par la station de mesure.

En effet, le débit d'un cours d'eau croît avec la superficie de son bassin versant, et il est communément admis que le rapport entre les débits en deux points d'un même cours d'eau est compris entre le rapport des surfaces et le rapport des carrés des surfaces du bassin versant en amont de ces points.

Cependant, si la station de jaugeage n'est pas trop éloignée de la future microcentrale et si les principales caractéristiques du bassin versant, telles que l'altitude, l'orientation, le couvert végétal,... n'évoluent pas de manière significative, nous pourrions supposer que le débit au niveau de la centrale est égal à celui relevé au niveau de la station de jaugeage, multiplié par le rapport des surfaces respectives du bassins versant.



① : station de jaugeage

② : centrale

Q₁ désigne le débit au niveau de la station de jaugeage.

Q₂, le débit au niveau de la centrale, vaut :

$$Q_2 = Q_1 \frac{S_2}{S_1}$$

où S₁ et S₂ désignent respectivement les surfaces du bassin versant en amont la station de jaugeage et de la centrale.

En pratique, il est souvent possible de se procurer le plan du bassin versant auprès du Syndicat en charge de la gestion du cours d'eau. A défaut, ses limites seront établies en suivant la ligne de crête sur une carte au 1/25 000^e. Après la numérisation au scanner du plan ainsi obtenu, les aires des surfaces intéressantes seront déterminées à l'aide d'un logiciel dédié au traitement des images, tel qu' « ImageJ », téléchargeable gratuitement sur Internet à partir du site : www.rsweb.nih.gov/ij/.

Le Dossier 1 exploite cette méthode.

2. Estimation du débit d'un cours d'eau non équipé d'une station de jaugeage :

Si l'aménagement à réhabiliter est alimenté par un cours d'eau ne comportant pas de station de jaugeage, la méthode la plus pertinente permettant d'obtenir des valeurs du débit représentatives du site à rénover, consiste à corréler ce débit à celui relevé par la station de jaugeage d'un cours d'eau voisin ayant un bassin versant de mêmes caractéristiques (altitude, orientation, nature du sol et couvert végétal similaires).

Pour appliquer cette méthode, nous relevons d'une part le débit au niveau du site à rénover, sur une durée de quelques mois à 1 an, à raison de plusieurs mesures par mois.

D'autre part, nous collectons les valeurs du débit relevées aux mêmes dates par la station de jaugeage équipant le cours d'eau voisin.

Plus les relevés sont nombreux et les conditions de débit variées, et plus la relation que nous mettrons en évidence sera représentative de la réalité.

Les 2 séries de valeurs seront ensuite traitées à l'aide d'un tableur, par exemple Excel, afin de mettre en évidence le lien existant entre elles :

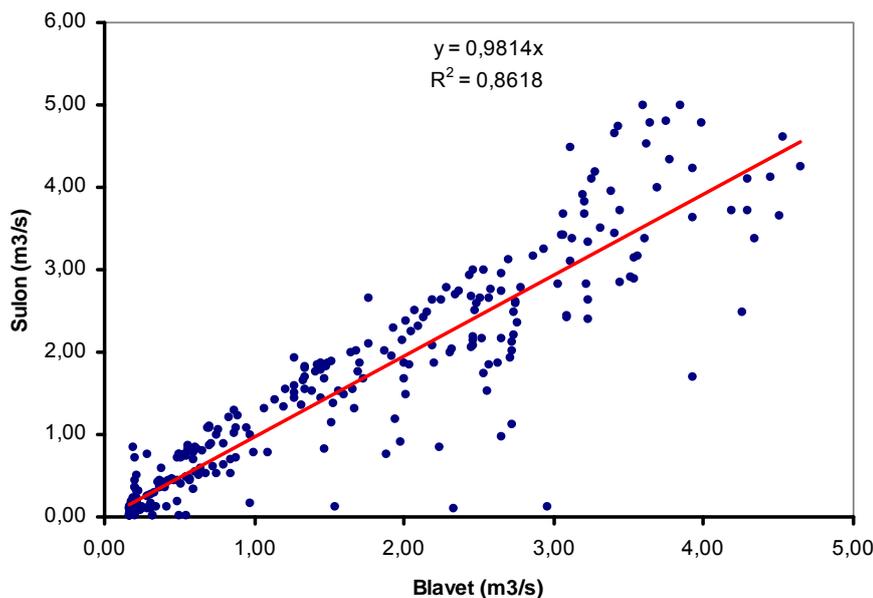
- Nous déterminons d'abord le coefficient de corrélation linéaire existant entre ces deux séries. Si celui-ci est compris entre 0,87 et 1, il existe une forte corrélation entre les débits des 2 sites : une relation linéaire pourra être établie entre eux.
- Nous reportons alors sur un graphique, jour par jour, les valeurs du débit au niveau du site à réhabiliter en fonction de celles fournies par la station de jaugeage. Le nuage de points obtenu est ensuite ajusté à la droite qui rend au mieux compte de la disposition de ses points. L'équation de cette droite met en évidence le lien entre les deux débits.
- Nous appliquons la relation obtenue à la courbe des débits classés fournie par la station de jaugeage, afin d'obtenir celle du site à réhabiliter.

Cette méthode peut également être appliquée si le site à rénover est très éloigné d'une station de mesure établie sur le même cours d'eau.

Exemple :

On souhaite établir la relation existant entre le débit du Sulon -un affluent du fleuve breton le Blavet- au niveau d'un moulin à réhabiliter, et celui mesuré par l'une des stations de jaugeage du Blavet.

- Le coefficient de corrélation vaut 0,94 : il existe une forte corrélation entre les débits des 2 sites.
- Diagramme et relation mise en évidence entre les débits des 2 sites :



On en déduit que $Q_{\text{Sulon}} = 0,98 \cdot Q_{\text{Blavet}}$

Un coefficient de détermination R^2 proche de 1 indique que la relation linéaire obtenue est fiable.

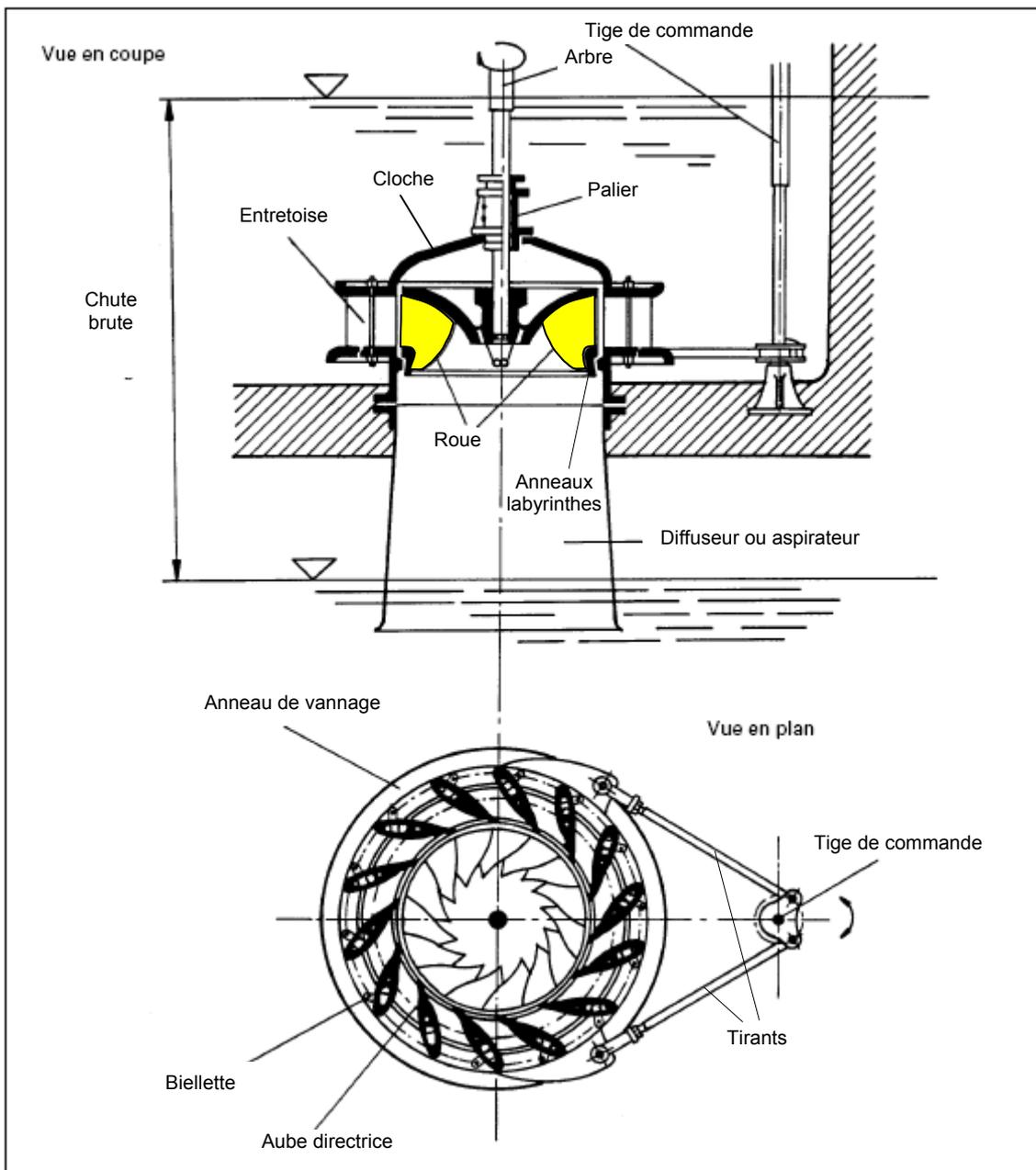
Fiche 4. Rénovation d'une turbine Francis en chambre d'eau :

1. Description de la turbine Francis :

La partie fixe de la turbine comprend l'anneau d'entretoises qui porte le distributeur et la cloche supportant le palier principal de la machine.

Le distributeur sert à régler le débit et à orienter l'écoulement de façon optimale vers les aubes de la roue. Il est constitué d'un ensemble d'aubes directrices dont l'orientation est réglée par l'intermédiaire des biellettes portées par l'anneau de vannage. Celui-ci est actionné par la tige de commande, par l'intermédiaire de deux tirants.

La roue est placée à l'intérieur du distributeur. L'arbre de la roue est porté et guidé par le palier principal.



2. Dégradations des turbines Francis (Source : courrier du laboratoire Mhylab)

« Sur une turbine, on rencontre trois types de dégradation :

- l'oxydation (rouille) ;
- l'abrasion, qui dépend de la charge de l'eau en matières abrasives ;
- l'érosion de cavitation, essentiellement sur les aubes de la roue motrice.

Généralement, le matériau utilisé dans la construction de ces anciennes turbines est la fonte d'acier. Ce matériau présente la caractéristique d'être résistant à la corrosion, mais peu à l'abrasion et à la cavitation. Toutefois, ces deux derniers phénomènes sont peu présents dans les Francis à très basse chute.

Si la corrosion est suffisamment importante pour modifier sensiblement les profils des aubages, il n'y a guère de solution avec la fonte, laquelle ne permet pas des recharges métalliques.

À vérifier plus particulièrement :

- la surface extradors des aubes ;
- les jeux entre les aubes directrices et les fonds ;
- les anneaux-labyrinthes entre roue et fonds, surtout du côté "basse pression", c'est-à-dire au niveau de la sortie de la roue, afin de limiter les pertes volumiques ».



Doc. OFQC

Roue de turbine Francis érodée par cavitation



Doc. OFQC

Plages érodées par cavitation sur l'extrados de l'aubage d'une roue Francis

3. Les paliers :

L'arbre vertical d'une turbine Francis est porté et guidé par son le palier principal, solidaire de la cloche. Celui-ci est fréquemment associé à un second palier assurant le guidage de l'extrémité supérieure de l'arbre, au voisinage de la poulie ou du pignon de renvoi.

Sur les anciennes turbines, ces paliers et butées sont traditionnellement garnis de coussinets en bronze ou en régule, un alliage antifriction d'étain, de plomb et d'antimoine.

Lors de la remise en service d'une turbine, il est indispensable de s'assurer du bon état de ces paliers, qui doivent assurer une rotation de l'arbre sans jeu ni friction excessifs.

Leur lubrification, qui joue un rôle capital, est à vérifier tout particulièrement, un manque d'huile entraînant l'échauffement, puis la destruction du coussinet.

Afin de prévenir tout échauffement excessif dont les conséquences seraient désastreuses, il est vivement conseillé de munir les paliers de capteurs de température raccordés à l'automate gérant la centrale. Dès que la température d'un palier dépasse la limite tolérable, l'automate stoppe la turbine, déclenche une alarme, et préserve ainsi la machine.

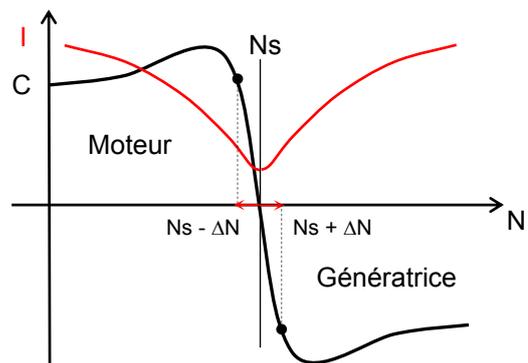
Fiche 5. Utilisation d'un moteur asynchrone en génératrice :

D'après « Les techniques de l'ingénieur » D 452.

Les caractéristiques d'une machine asynchrone fonctionnant en génératrice peuvent être déduites de ses caractéristiques nominales en moteur, en appliquant les **règles de symétrie**.

Pour obtenir des valeurs plus précises, il est nécessaire de s'adresser au constructeur.

Exemple : Machine de 45 kW, à 3 paires de pôles, couplée au réseau 400V - 50 Hz :



Caractéristiques	Moteur	Génératrice
Vitesse de synchronisme (tr/min)	1000	1000
Vitesse nominale (tr/min)	970	1030
Couple nominal (N.m)	430	- 430
Courant nominal sous 400V (A)	84	84

Puissance nominale :

En pratique, une machine qui fonctionne en moteur et en génératrice avec le même glissement*, aura sensiblement les mêmes pertes dans les deux cas et, par conséquent, environ le même rendement.

De ce fait, la puissance nominale (électrique) théorique d'une génératrice serait sensiblement égale à la puissance électrique absorbée en moteur au point nominal, et équivaudrait à la puissance nominale mécanique (mentionnée sur la plaque signalétique) divisée par le rendement.

Exemple : Un moteur de 45 kW ayant un rendement de 93,6% pourrait théoriquement fournir, en génératrice, une puissance nominale de $45/0,936 = 48$ kW.

En réalité, la puissance nominale de cette machine fonctionnant en génératrice **sera inférieure** à la valeur calculée ci-dessus, étant donné que le facteur de puissance en mode génératrice, $\cos \varphi_G$, est légèrement inférieur à celui du mode moteur, $\cos \varphi_M$.

La différence entre les facteurs de puissance en moteur et en génératrice est d'autant plus importante que la puissance de la machine est faible et que sa vitesse est basse.

Pour des puissances comprises entre 20 et 100 kW, on peut appliquer les corrections suivantes :

Nombre de paires de pôles :	2	3	4
Correction $\Delta \cos \varphi$:	0,02	0,03	0,04

Pour limiter les courants statoriques à leur valeur nominale, la puissance maximale de la génératrice

vaudra donc :
$$P_G = P_M \frac{1}{\eta_M} \frac{\cos \varphi_G}{\cos \varphi_M} \quad \text{avec } \cos \varphi_G = \cos \varphi_M - \Delta \cos \varphi$$

Exemple : Un moteur de 45 kW, de vitesse nominale 970 tr/min (3 paires de pôles), de $\cos \varphi_M = 0,83$ et de rendement $\eta_M = 93,6\%$, aura en génératrice, à la vitesse de 1030 tr/min, un $\cos \varphi_G = 0,80$ et fournira une puissance maximale :

$$P_G = 45 \frac{1}{0,936} \frac{0,80}{0,83} = 46,3 \text{ kW}$$

Fiche 6. Sectionnement et protection de découplage :

Les dispositifs décrits ci-dessous doivent obligatoirement équiper une installation de production raccordée au réseau public de distribution.

Dispositifs de sectionnement :

Lors de l'exécution de travaux hors tension sur le réseau public de distribution, celui-ci doit être séparé de toutes les sources de tension. Par conséquent, une installation de production devra être équipée d'un dispositif accessible depuis le domaine public, assurant cette séparation. Toutefois, la pose de ce dispositif incombe au gestionnaire du réseau de distribution.

L'installation de production devra également être munie d'un dispositif (sectionneur, disjoncteur-sectionneur) assurant sa séparation du disjoncteur de branchement, en vue des interventions sur ce dernier.

Protection de découplage :

Toute installation de production raccordée au réseau de distribution doit être équipée d'un dispositif de découplage destiné à la déconnecter automatiquement en cas de défaut survenant sur ce réseau¹. Cette obligation s'applique même si le producteur consomme la totalité de sa production.

- Une installation de production basse tension, d'une puissance comprise entre 10 et 250 kVA, sera équipée d'une protection de découplage de **type 2.1** .

Elle est constituée de relais agréés par le GRD, qui surveillent les tensions entre phases et neutre ainsi que la fréquence, au point de raccordement de l'installation au réseau public.

Ils commandent la séparation du réseau en cas de dépassement des seuils suivants :

- Minimum de tension : 85% de la tension nominale.
- Maximum de tension : 115% de la tension nominale.
- Minimum de fréquence : 49,5 Hz.
- Maximum de fréquence : 50,5 Hz.

- Une installation d'une puissance inférieure à 10 kVA peut être munie d'une protection de découplage de **type 2.2** .

Cette version simplifiée ne comporte que des relais de surveillance de la tension. Leurs seuils de déclenchement sont identiques à ceux du type précédent.

Les relais de découplage commandent l'ouverture de l'organe de découplage (disjoncteur-sectionneur, contacteur) qui assure la séparation de l'installation du réseau de distribution. Cet appareil, distinct du disjoncteur de branchement, doit être actionné par une commande à manque de tension ; son temps de réponse devrait être inférieur à 50 millisecondes.

Les circuits de mesure des relais sont raccordés soit au niveau du tableau de comptage, en amont du disjoncteur de branchement, soit au niveau du tableau général de l'installation, en aval du disjoncteur de branchement.



Relais de découplage

¹ EDF - Guide technique de la distribution d'électricité, - Chapitre B 61-41 : Protection des installations de production raccordées à un réseau de distribution

Fiche 7. Raccordement au réseau et vente de la production de l'électricité :

Une fois que son projet est bien défini et autorisé administrativement, le futur producteur devra mener, de préférence **en parallèle** pour gagner du temps, les 3 procédures permettant d'aboutir à la vente de l'énergie produite par sa centrale.

(Les adresses des différents organismes à contacter figurent au Carnet d'adresses, en fin de fiche).

I – Déclaration d'exploiter l'installation, auprès de la DIDEME :

Les installations de production « fondées en titre » doivent être déclarées à la DIDEME.

Le formulaire de déclaration, non disponible en ligne, peut être demandé à cet organisme sur simple appel téléphonique. Une fois complété, il sera retourné à la DIDEME, accompagné d'une pièce avérant la fondation en titre.

La DIDEME renvoie un **Récépissé de déclaration d'exploiter**, indispensable pour obtenir le raccordement au réseau public et pour bénéficier de l'obligation d'achat de l'énergie produite.

Les installations « autorisées », qui disposent d'une autorisation d'exploiter perpétuelle, ne sont en principe pas tenues à cette déclaration, les titres hydrauliques valant également autorisation.

II – Le raccordement de l'installation de production au réseau public de distribution

1. Le futur producteur adresse au gestionnaire de réseau de distribution (GRD) chargé du secteur géographique de la centrale, une **Demande écrite de raccordement** accompagnée d'une **Fiche de collecte de renseignements** correspondant à la catégorie de puissance de l'installation ($S \leq 36$ kVA ou $36 \text{ kVA} < S \leq 250$ kVA). Ces fiches, téléchargeables à partir du site Internet du GRD, permettent d'identifier le demandeur, le site et la nature de l'installation de production, ainsi que le type et les caractéristiques de la génératrice mise en œuvre.

Le futur producteur peut demander un devis pour chacune des options de raccordement (vente du surplus ou de la totalité de la production) ou juste pour l'option qu'il privilégie.

Si le GRD est EDF Réseaux de Distribution (ERD), les fiches de collecte de renseignements sont disponibles sur le site : www.edfdistribution.fr (producteurs/nos prestations/procédure de traitement des demandes).

La demande de raccordement sera adressée à :

- l'agence ARD (Accès au réseau de distribution) Grand Centre pour les installations de puissance inférieure ou égale à 36 kVA ;
- l'agence ARD couvrant le secteur géographique de la centrale, pour les installations de puissance supérieure à 36 kVA.

Remarque : Si la puissance de l'installation de production est supérieure à 36 kVA et si seules les grandes lignes du projet sont définies, le futur producteur peut demander une **Etude de faisabilité**, en procédant comme ci-dessus, mais en cochant l'option : étude de faisabilité, sur la fiche de collecte de renseignement. ERD répond dans un délai de 6 semaines.

Le GRD évalue alors uniquement l'impact de l'installation sur le réseau et ne délivre pas de devis de raccordement.

Dans un délai de 3 mois (6 semaines pour les installations de puissance inférieure à 5 kVA), le GRD élabore la **Proposition technique et financière** (PTF) qui précise les coûts de raccordement de l'installation au réseau. Cette proposition est valable 3 mois.

2. Le demandeur qui accepte les termes de la Proposition technique et financière, la signe et la retourne dans les 3 mois, accompagnée si possible :
 - du **Récépissé de la déclaration d'exploiter** délivré par la DIDEME (ou du document qui en tient lieu) ;
 - de l'**Accord de rattachement au périmètre d'un responsable d'équilibre** délivrée par le fournisseur/acheteur.

A la réception de la PTF validée, le GRD fait parvenir au futur producteur, dans un délai de 3 mois,

- un **Contrat de raccordement, d'accès et d'exploitation** (CRAE), dans le cas d'une installation de production de moins de 36 kVA
 - les **Conventions de raccordement et d'exploitation**, puis un **Contrat d'accès au réseau**, dans le cas d'une installation de plus de 36 kVA.
3. Le futur producteur dispose alors de 3 mois pour retourner au GRD les documents signés et accompagnés, selon le cas, du règlement de l'acompte ou de la totalité des frais de raccordement.

Le futur producteur et le GRD réalisent les travaux qui leur incombent respectivement.

Le GRD procède ensuite à la **Mise sous tension de l'installation**, à condition que le producteur ait :

- Réglé la totalité du coût des travaux de raccordement ;
- Transmis au GRD une **Attestation d'Assurance responsabilité civile** couvrant tous les dommages corporels, matériels et immatériels susceptibles de survenir au cours du fonctionnement de l'installation de production (Cette attestation doit clairement mentionner la présence d'une installation de production hydraulique raccordée au réseau public de distribution) ;
- Fourni, selon le cas, une **Attestation de conformité** délivrée par le Consuel, ou une déclaration sur l'honneur de la conformité de l'installation à la norme NF C 15-100 ;
- Transmis au GRD le **Récépissé de la déclaration d'exploiter** et l'**Accord de rattachement au périmètre d'un responsable d'équilibre**.

III – Les démarches en vue de la vente de l'énergie produite :

La vente de l'énergie dans le cadre de l'obligation d'achat :

Le futur producteur qui souhaite bénéficier de l'obligation d'achat devra accomplir les démarches suivantes :

1. Demander à la DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement) du département où est située la centrale, un **Certificat ouvrant droit à l'obligation d'achat**.

Cette demande précisera : l'identité du demandeur, la localisation de la centrale, l'énergie primaire utilisée et la technique de production employée, la puissance installée, la capacité de production et le nombre prévisionnel d'heures de production annuelle.

La DRIRE exigera également une attestation de la DDAF, stipulant que la centrale est en règle par rapport à l'ensemble de la réglementation relative à la protection du milieu aquatique.

2. Adresser une **Demande Complète de Contrat** (DCC), expédiée par lettre recommandée avec accusé de réception, à l'Agence Obligation d'Achat (AOA) d'EDF gérant son secteur géographique pour les puissances supérieures à 36 kVA, ou à l'AOA de Lyon pour les puissances inférieures à cette valeur (voir le carnet d'adresses), ou, le cas échéant, à l'entreprise locale de distribution.

Le formulaire nécessaire est expédié par l'AOA sur un simple appel téléphonique.

Cette demande devra être accompagnée de la description succincte de l'installation (Nombre et type des génératrices, puissance installée, production annuelle, et, le cas échéant, la puissance maximale d'autoconsommation, ...).

3. Le producteur notifie à l'AOA, par lettre recommandée avec accusé de réception, la date de **Mise en Service Industrielle**, qui correspond au début officiel de la production. Celle-ci doit intervenir dans les 3 ans suivant la Demande Complète de contrat.

L'Agence Obligation d'Achat (ou l'entreprise de locale de distribution) fait parvenir le contrat d'achat (3 exemplaires) au futur producteur.

4. Le producteur signe puis retourne le contrat d'achat accompagné :
 - du **Certificat ouvrant droit à l'obligation d'achat** délivré par la DRIRE ;

- du **Récépissé de la Déclaration d'exploiter une installation hydroélectrique** délivré par la DIDEME (ou du document en tenant lieu) ; ce document a également été nécessaire pour obtenir l'accès au réseau.

L'AOA retourne un exemplaire du contrat au producteur.

Le contrat d'achat signé prend effet à la **Mise en Service Industrielle** de l'installation.

La vente de l'énergie en dehors du cadre de l'obligation d'achat :

Le futur producteur qui souhaite vendre l'énergie produite par sa centrale à un fournisseur du marché doit prendre contact avec ce fournisseur pour définir les conditions de l'achat de l'énergie.

Ce fournisseur fournira également l'**Accord de rattachement au périmètre d'un responsable d'équilibre**, indispensable pour obtenir le raccordement au réseau de distribution.

Carnet d'adresses :

La DIDEME : DGEMP- DIDEME
6^e sous direction électricité
Télédoc 122
61, Boulevard Vincent Auriol
75703 PARIS CEDEX 13
Tél : 01 44 87 17 17

Les Agences Régionales de Distribution :

ERD Est
Agence ARD Est
Allée Philippe Lebon - BP 80428
57954 Montigny-les-Metz Cedex
Tél. : 03 87 55 69 40
Fax : 03 87 55 69 09
ard-est@distribution.edf.fr

ERD Grand Centre
Agence ARD Grand Centre
15, rue de la Tuilerie - BP 60 503
37 555 Saint-Avertin cedex
Tél. : 02 47 80 25 72
Fax : 02 47 80 25 71
ard-cen@distribution.edf.fr

ERD Île-de-France
Agence ARD Île-de-France
Tour Winterthur
92085 Paris La Défense Cedex
Tél. : 0825 897 944
Fax : 01 76 68 48 38
ard-idf@distribution.edf.fr

ERD Manche Mer du Nord
Agence ARD Manche Mer du Nord
16, rue Delphin Petit - TM 9072
59041 Lille Cedex
Tél. : 03 20 21 53 82
Fax : 03 20 21 53 88
ard-mmn@distribution.edf.fr

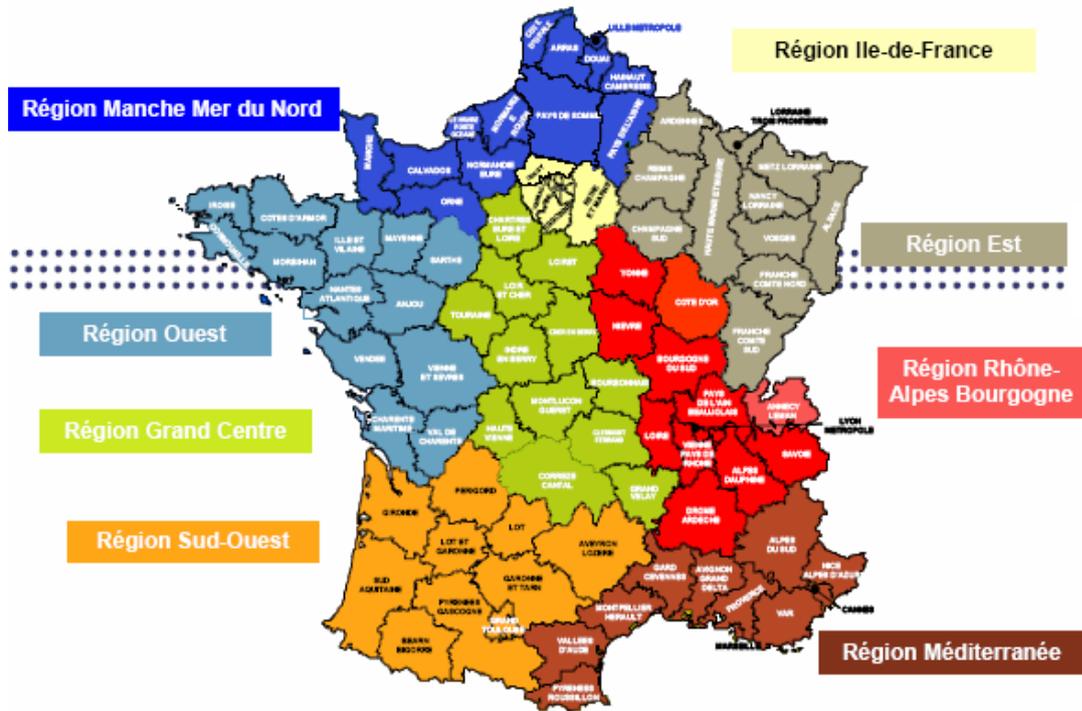
ERD Méditerranée
Agence ARD Méditerranée
Les jardins de la Duranne
510, rue René Descartes - BP 10458
13592 Aix-en-Provence Cedex 3
Tél. : 04 88 78 81 10
Fax : 04 88 78 81 11
ard-med@distribution.edf.fr

ERD Ouest
Agence ARD Ouest
35 bis, rue Crossardière - BP 304
53003 Laval Cedex
Tél. : 02 43 59 53 03
Fax : 02 43 59 53 05
ard-ouest@distribution.edf.fr

ERD Rhône-Alpes Bourgogne
Agence ARD Rhône-Alpes Bourgogne
Immeuble Vilette
26, rue de la Vilette
69328 Lyon Cedex 03
Tél. : 04 26 29 88 44
Fax : 04 26 29 88 40
ard-rab@distribution.edf.fr

ERD Sud-Ouest
Agence ARD Sud-Ouest
106 rue des Troènes - BP 92449
31085 Toulouse Cedex 2
Tél. : 05 56 94 47 22
Fax : 05 34 45 91 20
ard-so@distribution.edf.fr

Les zones géographiques gérées par les Agences ARD :



Document EDF

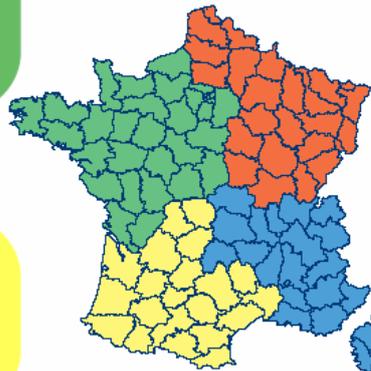
Les Agences Obligation d'Achat EDF :

Agence OA Centre-Ouest
 8, rue de Boutteville
 BP 437
 37204 Tours Cedex 03
 Tél. : 02 47 21 21 00
 Fax : 02 47 21 21 02

Agence OA Nord-Est
 BP 647
 57146 Woippy Cedex
 Tél. : 03 87 53 35 35
 Fax : 03 87 53 35 36

Agence OA Sud-Ouest
 Parc d'activité de la Mounède
 3, rue Claude-Marie Perraud
 31100 Toulouse
 Tél. : 05 34 45 20 20
 Fax : 05 34 45 20 44

Agence OA Sud-Est
 9, rue des Cuirassiers
 BP 3013
 69399 Lyon Cedex 03
 Tél. : 04 78 71 43 93
 Fax : 04 78 71 64 17



Document EDF

Fiche 8. Notice d'utilisation du Classeur Excel « Calcul-hydro » :

1. Description :

Le classeur Excel « Calcul hydro » est destiné à évaluer la production annuelle d'énergie d'un aménagement de basse chute.

Il comporte 4 feuilles de calcul actives et exploite la méthode décrite au chapitre IV.

- La feuille « Site » permet :
 - La saisie des coordonnées du site et de ses caractéristiques hydrauliques, telles que les hauteurs de chute brute et nette, le débit d'équipement, le débit réservé.
 - La sélection du type de données hydrologiques utilisées pour le calcul de la production (courbe de débits classés provenant de la banque de données Hydro ou fichier détaillé des débits journaliers).
 - L'affichage des courbes des débits classés et de la production, en fonction des données saisies et des traitements effectués sur les autres feuilles.
 - L'affichage des résultats des calculs : les valeurs de la production annuelle d'énergie et du nombre de jours de fonctionnement de l'installation.
- La feuille active « Hydrologie » est dédiée à la saisie des données hydrologiques du cours d'eau, en fonction de la sélection effectuée sur la feuille « Site » :
 - La feuille « Hydrologie 1 » permet la saisie des débits classés apparaissant sur la **Fiche de synthèse hydrologique** de la banque de données Hydro.
 - La feuille « Hydrologie 2 » assure le traitement des fichiers des débits journaliers, fournis par les organismes gérant les stations de jaugeage.
- La feuille « Equipement » permet :
 - La sélection du type du moteur hydraulique et la saisie de son rendement au débit nominal.
 - L'affichage de la courbe de rendement du moteur sélectionné et de la puissance mécanique nominale disponible sur son arbre.
 - La saisie du rendement du multiplicateur.
 - La sélection du type de génératrice, ainsi que la saisie de sa puissance et de son rendement au point nominal.
 - L'affichage de la courbe de rendement de la génératrice sélectionnée et de la puissance électrique maximale fournie.
- La feuille « Calcul énergie » sert de support aux calculs de la production d'énergie, à partir des paramètres saisis sur les feuilles précédentes. Elle ne permet elle-même aucune saisie, mais récapitule toutes les données fondamentales entrées sur les autres feuilles et affiche l'ensemble des courbes utilisées : celles du rendement du moteur hydraulique et de la génératrice, la courbe des débits classés ainsi que celle de production d'énergie.

Remarque importante : La méthode de calcul ne tient pas compte de l'élévation du niveau aval par hautes eaux.

2. Utilisation :

Toutes les zones de saisie sont repérées en jaune.

Un fond de cellule virant au rouge indique une erreur de saisie.

La Feuille « Site » :

- Après la saisie des coordonnées du site, nous procéderons à celle des caractéristiques de la chute :

- La "Hauteur de chute brute" est celle mesurée de préférence lorsque le débit du cours d'eau est proche du module, c'est-à-dire de sa valeur moyenne interannuelle.
Dans le cas d'une turbine à flux traversant ou d'une roue en dessus, il convient de ne prendre en compte que la hauteur de la chute pouvant effectivement être exploitée par la machine.
 - La "Hauteur de chute nette" devra être estimée en déduisant de la valeur précédente l'ensemble des pertes de charge qui interviennent lorsque le débit absorbé est égal à sa valeur d'équipement. Le « Guide technique pour la réalisation de projets », d'ESHA, détaille au Chapitre 3 la méthode de calcul de ces pertes de charge.
 - Le "Débit d'équipement" correspond à la somme des débits nominaux de l'ensemble des moteurs hydrauliques devant fonctionner simultanément sur le site.
 - Le "Débit réservé" équivaut au débit réservé proprement dit, augmenté du débit prélevé par un éventuel captage et de celui perdu du fait des fuites du barrage ou des ouvrages d'aménée.
- Le sélecteur "Hydrologie" nous donne directement accès à la feuille de calcul « Hydrologie » adéquate.
 - Si nous ne disposons que des informations fournies par la Banque de données Hydro, nous sélectionnerons : "Fichier condensé (Hydro)".
 - En revanche, si nous disposons du fichier des débits journaliers mesurés sur une durée supérieure à 5 ans, nous choisirons : "Fichier détaillé".

b. Feuilles « Hydrologie » :

• La feuille « Hydrologie 1 » :

Cette feuille exploite la courbe moyenne des débits classés du cours d'eau.

- Dans la colonne "Débit", nous saisisons, le cas échéant après leur correction en fonction des surfaces respectives des bassins versants, les points de la courbe moyenne des débits classés figurant au bas de la « **Fiche de synthèse hydrologique** » du cours d'eau, disponible sur le site Internet de la Banque de données Hydro.

Nota : la première colonne du tableau mentionne la fréquence à laquelle le débit est supérieur ou égal à la valeur à saisir. Cette fréquence est égale au complément à 100 de celle donnée pour le même débit par le tableau de la « Fiche de synthèse hydrologique », et qui correspond à la fréquence à laquelle le débit est inférieur ou égal à cette même valeur.

- Si nous projetons également d'évaluer la production de la centrale durant les années de conditions extrêmes, nous devons copier dans les colonnes adéquates ("A. sèche" et "A. humide"), les débits classés des années sèche et humide particulièrement significatives.

Ces informations seront également obtenues par la Banque de données Hydro :

Tout d'abord, nous repérons sur son site Internet les années où le débit moyen du cours d'eau est extrême. Ensuite nous affichons, pour l'année la plus sèche, les valeurs des débits journaliers du cours d'eau données par la fiche « **QJM** » (débits journaliers et mensuels), puis nous copions ces informations, en format texte, de l'écran de l'ordinateur vers une nouvelle feuille de calcul Excel.

Après leur conversion en valeurs numériques, leur correction, le cas échéant, en fonction des surfaces respectives des bassins versants et leur classement par valeurs décroissantes, les débits obtenus seront copiés dans la colonne adéquate de la feuille « Hydrologie 1 ».

En tête de cette colonne, nous reporterons obligatoirement l'année correspondante.

Nous reprendrons, si nécessaire, ces opérations pour l'année la plus humide.

- Les données saisies seront prises en compte lors de l'activation du bouton "Valider". Cette action nous fera également revenir à la feuille « Site », où s'affichera la courbe moyenne des débits classés.

• La feuille « Hydrologie 2 »

Les données à exploiter devront couvrir des années civiles entières et être organisées sur 2 colonnes : la première donnant la date, au format du type 30/05/2007, et la seconde, le débit

correspondant, en m^3/s . Pour être représentatives du comportement du cours d'eau, les mesures devront s'étendre sur au moins 5 ans.

- Les données à traiter seront copiées dans les colonnes "Date" et "Débit" prévues à cet effet. Nous reporterons également dans les cellules "Fichier des débits journaliers de – à –", les années de début et de fin de cette série de données.
- Nous définirons ensuite, dans les cellules "Analyse de – à –", les années délimitant la plage à analyser. A l'activation du bouton "Analyse", le logiciel classe les débits de chaque année, détermine les points de la courbe moyenne des débits classés et recherche les années où le débit du cours d'eau est extrême. Cette action nous fera également revenir à la feuille « Site », où s'affichera la courbe moyenne des débits classés.

c. Feuille « Equipement » :

- Le menu déroulant "Moteur Hydro" permet la sélection du type du moteur hydraulique équipant la centrale et de sa courbe de rendement générique (pour les turbines Kaplan : SR = simple réglage ; DR = double réglage). La courbe affichée tient compte du rendement de la machine au point nominal, que nous aurons saisi dans la cellule "Rendement n".
Si la machine prévue ne figure pas dans la liste ou si sa courbe de rendement ne correspond pas à celle proposée, l'option "personnaliser" nous permettra de saisir, dans la colonne "Rendement %", les points de sa véritable caractéristique et, dans la cellule "Débit mini", la valeur du débit relatif minimal assurant le fonctionnement de la machine.
Par ailleurs, si la centrale est équipée de plus d'un groupe hydrogénérateur, nous devons établir la courbe de rendement globale de l'association, puis la saisir comme indiqué ci-dessus.
- La valeur du rendement du multiplicateur de vitesse (voir page 39) sera saisie dans la cellule "Transmission η (%)".
- Le menu déroulant "Génératrice" permet la sélection du type de la génératrice couplée au moteur hydraulique et de sa courbe de rendement générique. La courbe affichée tient compte de la puissance nominale de la machine, que nous aurons saisi dans la cellule "Puissance", d'après la valeur affichée de la puissance mécanique maximale disponible en sortie du multiplicateur. Si la puissance nominale choisie est inférieure à la puissance électrique maximale pouvant être produite, le fond de la cellule "Puissance" vire au rouge. Il faudra alors sélectionner une génératrice de puissance supérieure.
Par ailleurs, le rendement générique proposé d'après la puissance de génératrice peut être modifié à tout moment, en fonction de la valeur réelle annoncée par le constructeur.
Si la courbe de rendement ne correspond pas celle proposée, l'option "personnaliser" nous permet de saisir la véritable caractéristique de la machine.

d. Retour à la feuille « Site »

Après la saisie de l'ensemble des paramètres des feuilles précédentes, les résultats des simulations sont disponibles sur la feuille « Site ».

Nous y trouverons, pour une année moyenne, la production totale d'électricité, le nombre de jours de fonctionnement de l'installation et la courbe classée de la puissance produite. Cette dernière visualisera en particulier le nombre de jours de fonctionnement à pleine puissance, ainsi que l'énergie produite, qui correspond à l'aire délimitée.

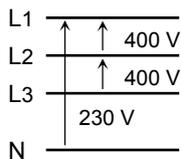
La liste déroulante "Calcul à partir de" permet d'afficher ces mêmes informations pour les années de conditions extrêmes (à condition que les données correspondantes aient été saisies) et, si la feuille « Hydrologie2 » est active, pour chacune des années de la plage analysée.

Par ailleurs, il est possible à tout moment de retourner aux autres feuilles de calcul, et en particulier à la feuille « Equipement », pour modifier les caractéristiques de la chaîne de conversion de l'énergie et d'évaluer leur impact sur la production.

Glossaire :

- **Acier Corten** : nom commercial d'un acier spécial. Exposé à l'air, il se couvre d'une couche d'oxyde qui protège le cœur du métal de la corrosion.
- **Batardeau** : digue ou barrage provisoire permettant d'assécher une partie d'un ouvrage où l'on veut effectuer des travaux.
- **Bassin versant** : zone géographique recevant les précipitations qui alimentent un cours d'eau.
- **Chiffre d'affaires** : montant annuel des ventes.
- **Consuel** : Comité National pour la Sécurité des Usagers de l'Electricité, agréé par l'arrêté du 17 octobre 1973 pour exercer le contrôle de la conformité des Installations Electriques Intérieures aux règlements et normes de sécurité en vigueur.
- **Contacteur** : appareil de connexion électromécanique commandé par un électro-aimant. Il permet de commander la mise en marche et à l'arrêt d'un moteur ou le couplage d'une génératrice sur le réseau.

- **Courants alternatifs triphasés** : ensemble de trois courants alternatifs, de même fréquence. Sur une installation dite équilibrée, c'est à dire présentant 3 circuits identiques, ces courants ont la même valeur efficace et sont décalés l'un par rapport à l'autre de 1/3 de période.



Un réseau triphasé à 4 conducteurs comporte 3 conducteurs de phase (L) et un neutre (N).

Sur le réseau public 50 Hz, la tension nominale entre chaque conducteur de phase et le neutre vaut 230V.

Celle entre 2 conducteurs de phase vaut $400 \text{ V} = 230 \cdot \sqrt{3}$.

- **Energie active / réactive** : un appareil alimenté en courant alternatif absorbe :
 - de l'énergie active, qui est convertie en énergie mécanique, calorifique, chimique,...
 - de l'énergie réactive, qui sert à produire le champ magnétique nécessaire au fonctionnement de l'appareil. Elle peut être fournie par le réseau électrique ou par des condensateurs.
- **Etiage** : baisse périodique des eaux d'un cours d'eau ; niveau le plus bas atteint par un cours d'eau.
- **Glissement** : le glissement **g** d'une machine asynchrone désigne l'écart relatif entre sa vitesse de synchronisme N_s et sa vitesse réelle N :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

En moteur : $N < N_s$, donc $g > 0$.

En génératrice : $N > N_s$, donc $g < 0$.

En fonctionnement normal, la vitesse du rotor reste très proche de la vitesse de synchronisme. Le glissement d'une génératrice asynchrone est donc très faible (quelques %).

- **Module** : d'un cours d'eau ou débit moyen interannuel ; il correspond à la moyenne du débit du cours d'eau, calculée sur une durée au moins égale à 5 ans.
- **SCIC** : la SCIC est une structure juridique récente de coopérative visant un intérêt collectif (dépassement de l'intérêt direct des membres ou de la coopérative au profit de la satisfaction des besoins de la société civile) et une utilité sociale (association d'acteurs d'horizons et d'intérêts différents, fonctionnement démocratique, empêchement de l'enrichissement personnel des membres...). L'une des principales innovations apportées par les SCIC est d'imposer le multi-sociétariat (associés hétérogènes, appartenant à des catégories différentes). Les collectivités territoriales peuvent accorder des subventions aux SCIC et participer au capital à hauteur de 20%.

Bibliographie :

Hydroélectricité :

ADEME (F) :

- Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité.
- L'énergie à sa source.
- Guide d'accompagnement vers une certification ISO 14001

Office Fédéral des Questions Conjoncturelles (CH) :

- Petites centrales hydroélectriques (Programme PACER)
- Turbines hydrauliques.
- Générateurs et installations électriques.
- Régulation et sécurité d'exploitation.
- Le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une miniturbine.

Office Fédéral de l'Energie (CH) :

- Rénover au lieu d'abandonner (Programme DIANE).
- Petites centrales hydrauliques et écologie des eaux.
- Poissons et petites centrales hydrauliques.

ESHA :

- Petite hydroélectricité - Guide technique pour la réalisation de projets.

AJENA : L'énergie hydroélectrique – Comment rénover son moulin en préservant l'environnement.

Hydrologie :

- A. MUSY- C. HIGY - Hydrologie, une science de la nature. Ed : Presses polytechniques et universitaires.

Ouvrages hydrauliques :

- S. Merckle – CEMAGREF - Diagnostic et restauration de seuils en rivière, publié dans l'écho de l'eau N°7 et dans les N°43 et 44 de la revue Moulins de France, de la FFAM.
- CEMAGREF & EPIDOR - La restauration et l'entretien des seuils du bassin de la Cère.
- R. Sinniger et W. Hager - Traité de Génie Civil de l'EPFL. Vol. 15 – Constructions hydrauliques. Ed : Presses Polytechniques Romandes.

Moteurs hydrauliques :

- Gerald MÜLLER - Water wheels as a power source.
- Gerald MÜLLER et C. WOLTER - The breastshot waterwheel : design and model tests.
- Michel DUBAS - Design and efficiency of overshot water-wheels – U. A. S. Sion (CH).
- Patrick WIEMANN -Review of current developments in low head, small hydropower - Civil Engineering Department, University of Southampton.

Electrotechnique :

- Les techniques de l'ingénieur - Génératrices asynchrones : Dossier D452.

Sites Internet :

ADEME (France) : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.	www2.ademe.fr
CEMAGREF (France) : Centre de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et l'environnement.	www.cemagref.fr
CLER (France) : Comité de liaison Energies Renouvelables, Association loi 1901.	www.cler.org
CIELE (France) : Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement.	www.ciele.org
ESHA : Association Européenne pour la Petite Hydraulique.	www.esha.be
Office fédéral de l'énergie (Suisse) :	www.smallhydro.ch
GPAE (France) : Groupement de producteurs autonomes d'énergie hydro-électrique.	www.gpae.com
Banque de données hydrologiques :	www.hydro.eaufrance.fr
Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable :	www.environnement.gouv.fr
DGEMP : Direction générale de l'Energie et des matières premières.	www.industrie.gouv.fr/energie
Textes règlementaires de la législation française :	www.legifrance.gouv.fr
Mhy Lab : Laboratoire indépendant suisse spécialisé en hydroélectricité.	www.mhylab.com
Université de Southampton :	www.soton.ac.uk
Association HESPUL (France) :	www.hespul.org
Association APERE (Belgique) :	www.apere.org
Associations de défense des moulins :	
FFAM : Fédération Française des Amis des Moulins.	www.moulinsdefrance.org
SDMCE : Syndicat de Défense des Moulins et Cours d'Eau.	www.moulinaeau.org
Fabricants de roues à aubes :	
perso.orange.fr/michel.fonfrede/63cf/ROUERM.htm	
www.bega-wasserkraft.de	
www.hydrowatt.de	
www.wasserrad-drehs.de	

Fabricant de vis hydrodynamique : www.ritz-atro.de

Distributeurs et Fournisseurs d'électricité :

EDF : www.edfdistribution.fr

Voir aussi les pages 101 – 102.

Enercoop : www.enercoop.fr

Les interlocuteurs :

DDAF : Direction départementale de l'Agriculture et de la Forêt :
Principal interlocuteur pour toutes les déclarations et autorisations relatives aux travaux dans les cours d'eau.

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques :
Assure sur le terrain la police de l'eau.

Les textes de loi concernant l'énergie hydraulique :

• Entreprises hydroélectriques, recueil de textes, voir sur : www.environnement.gouv.fr

Les textes de référence concernant l'obligation d'achat de l'énergie produite par les installations hydrauliques : voir sur : www.legifrance.gouv.fr

- Loi du 10.02.2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité (Article 10).
- Arrêté du 13.03.2002 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations d'une puissance inférieure ou égale à 36 kVA.
- Arrêté du 7.09.2005 relatif à la rénovation des installations utilisant l'énergie hydraulique.
- Arrêté du 1.03.2007 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie hydraulique.

Résumé

Vers 1850, la France comptait plus de 100 000 moulins hydrauliques en activité. La plupart de ces installations cessèrent de fonctionner au cours du XX^e siècle, en raison d'un manque de compétitivité.

Au moment où la France cherche à développer la production d'électricité à partir de ses ressources renouvelables pour lutter contre le réchauffement climatique et assurer son indépendance énergétique, un rapport officiel rappelle le potentiel des moulins, qui pourraient revenir sur le devant de la scène, convertis en petites centrales hydroélectriques.

En effet, les évolutions technologiques et une meilleure valorisation de l'électricité produite permettent maintenant d'assurer la viabilité de ces petites installations.

Cependant, le porteur de projet qui souhaite entreprendre une telle réhabilitation s'engage souvent dans un véritable labyrinthe, tant du point de vue réglementaire qu'au niveau des choix technologiques ou environnementaux.

Ainsi, cette étude est destinée à guider le concepteur tout au long de sa démarche.

Après une mise au point sur les avantages de la petite hydroélectricité en général, et de la réhabilitation des moulins en particulier, cette étude aborde le cadre réglementaire très strict dans lequel la rénovation devra être réalisée.

La méthode permettant d'évaluer le potentiel hydraulique d'un site, et les différents aspects techniques sont ensuite passés en revue, depuis le barrage jusqu'à l'automatisme gérant l'installation, en passant par la génératrice électrique et le moteur hydraulique, véritable cœur de tout aménagement hydraulique.

En plus des turbines assurant habituellement cette fonction, des solutions alternatives souvent méconnues sont également présentées : par exemple, les roues à aubes modernes et les vis hydrodynamiques, parfaitement adaptées au contexte d'un moulin.

Bien entendu, pour donner au porteur de projet les moyens d'effectuer le meilleur choix, les points forts et les points faibles de chaque solution technique sont mis en évidence.

Véritable dédale structurel, le raccordement au réseau électrique est également passé au crible.

L'aspect environnemental, incontournable dans toute démarche de développement durable, tient une place importante dans cette étude par l'analyse des impacts possibles et des mesures correctives.

L'aspect humain n'est pas négligé, avec l'évocation de partenariats originaux permettant de mener à bien une réhabilitation dans l'intérêt collectif.

En définitive, cette étude détaille une démarche cohérente, illustrée par deux cas de figure.

Enfin, des fiches présentent des compléments d'information sur des thèmes précis pouvant intéresser le concepteur.

Mots clés :

Hydroélectricité, Moulin hydraulique, Microcentrale hydroélectrique.

Turbine, Roue à aubes, Vis hydrodynamique.

Barrage, Seuil, Passe à poissons, Réhabilitation.

Génératrices, Automates programmables, Supervision.

Hydrologie.