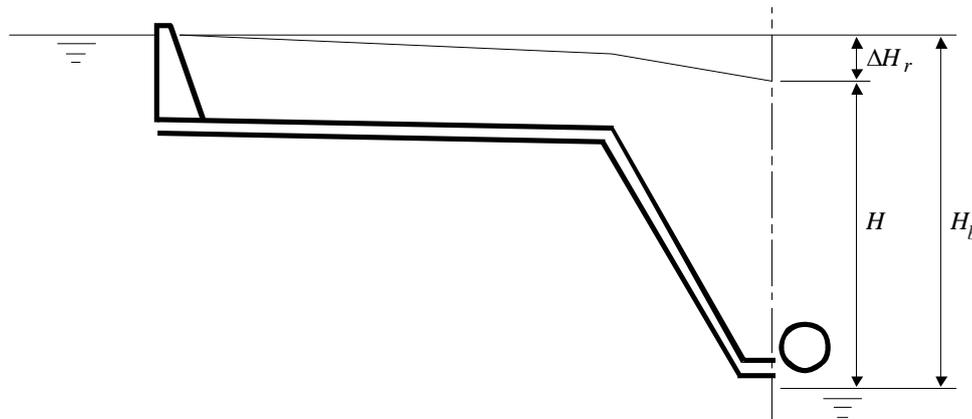


Guide pour l'étude sommaire de petites centrales hydrauliques

Michel Dubas Yves Pigueron



© Droits de reproduction réservés

1^e édition, octobre 2009

MiniHydro V1

Table des matières

- * Les paragraphes marqués d'un astérisque se rapportent à l'utilisation du programme MiniHydro et peuvent être sautés par les lecteurs intéressés aux connaissances de base.

Introduction

Notation

- 1 Débits à disposition
 - 1.1 Types d'eaux turbinables
 - 1.2 Débits au cours d'une année, débits classés
 - 1.3 Choix du débit d'équipement
 - 1.4 Cours d'eau: débits prélevables et débits résiduels
 - 1.5* La page "Débit" du programme MiniHydro

- 2 Conduite, pertes de charge, chute, autres ouvrages hydrauliques
 - 2.1 Pertes d'énergie dans une conduite
 - 2.2 Chute brute, chute nette
 - 2.3 Types de tuyaux, fouille
 - 2.4 Prise d'eau, dessableur, chambre de mise en charge, by-pass
 - 2.5* La page "Conduite" du programme MiniHydro

- 3 Calcul de l'énergie produite
 - 3.1 Energie totale produite en une année
 - 3.2* La page "Energie" du programme MiniHydro

- 4 Raccordement au réseau électrique et signaux de commande
 - 4.1 Câbles et équipements nécessaires au raccordement à basse tension
 - 4.2 Câbles et équipements nécessaires au raccordement à moyenne tension
 - 4.3 Signal nécessaire à la commande de la turbine
 - 4.4* La page "Raccordement" du programme MiniHydro

- 5 Investissements
 - 5.1 Bâtiments, prise d'eau, réservoir
 - 5.2 Conduite forcée
 - 5.3 Equipement électromécanique
 - 5.4 Raccordement électrique et câblage de commande
 - 5.5 Divers
 - 5.6* La page "Investissements" du programme MiniHydro

- 6 Rentabilité
 - 6.1 Frais annuels, prix de revient du courant
 - 6.2 Rétribution du courant injecté
 - 6.3 Rentabilité
 - 6.4* La page "Rentabilité" du programme MiniHydro

Bibliographie, liens internet

Introduction

Buts du présent guide

Le présent guide a pour but premier de montrer comment faire ce qu'on appelle une *étude sommaire* pour un projet de petite centrale hydro-électrique; selon les textes et les auteurs, une telle étude est parfois également appelée étude de faisabilité, étude préliminaire, préétude ou encore avant-projet. Nous décrivons donc toutes les informations, en expliquant leur signification physique, dont il est nécessaire de disposer pour estimer, de manière plus ou moins grossière en un premier temps, la rentabilité d'une mini-centrale hydro-électrique dont le projet vient d'être conçu. Selon la qualité de ces informations, le résultat de l'étude sera plus ou moins solide, et les conclusions montreront par exemple qu'il est nécessaire de rechercher des données plus détaillées et plus fiables, ou alors, dans les meilleurs cas, que l'on peut directement demander des offres à des fournisseurs et passer à la réalisation.

Connaissant la démarche, le lecteur sera aussi à même de suivre une telle étude qui serait réalisée par quelqu'un d'autre, de lui poser les "bonnes questions", de lui fournir les informations adéquates et de juger de ce qu'on lui dit. De même, dans les étapes suivantes menant à la réalisation, s'il doit en particulier jouer le rôle de *maître d'oeuvre*, il pourra utilement participer aux discussions, juger des offres qui lui seront soumises et suivre le déroulement des travaux.

Nous décrivons brièvement les concepts nécessaires à la réalisation de l'étude de faisabilité, sans toutefois développer entièrement les bases théoriques; pour plus de développements, en particulier sur la mécanique des fluides, les machines hydrauliques ou les machines électriques, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages cités dans la bibliographie donnée à la fin du texte. Par ailleurs, les brochures [0.1] à [0.4], disponibles sur internet, et qui sont consacrées aux petites centrales, permettent d'approfondir le sujet. Ajoutons encore que la notation que nous utilisons est basée sur la norme CEI 60041 (cf. la référence [5.1]) sur les machines hydrauliques.

Définition d'une petite centrale hydraulique

Au début du présent texte, donnons une définition d'une petite centrale hydraulique en reprenant celle donnée dans l'annexe à l'Ordonnance sur l'approvisionnement en électricité (cf. dans la bibliographie le no [9.5], appendice 1.1), annexe concernant la modification de la Loi sur l'énergie [9.2]: on appelle "petite centrale hydraulique tout aménagement technique autonome destiné à produire de l'électricité à partir de la force hydraulique en un lieu déterminé, qui comprend notamment les éléments suivants: les ouvrages d'accumulation, les installations de captage d'eau, les conduites sous pression, les turbines, les générateurs, les dispositifs d'injection, les équipements de pilotage". La puissance maximale d'une mini-centrale est de 10 MW, cette puissance étant une puissance brute, c'est-à-dire qui ne tient pas compte des pertes de l'aménagement (cf. là aussi l'Ordonnance sur l'approvisionnement en électricité [9.5], à l'annexe concernant les modifications du droit actuel).

Le programme MiniHydro

Le présent guide décrira la manière d'utiliser le petit *programme informatique* intitulé *MiniHydro*, lequel reproduit, à l'aide d'un tableur (EXCEL dans le cas présent) la démarche que nous allons décrire. Ce programme a pour but de simplifier, d'accélérer et de rendre plus sûr le travail de qui entreprend une étude sommaire: il réalise les calculs nécessaires et évite certaines erreurs à son utilisateur. Il est toutefois important de souligner ici que ce programme ne supprime pas le travail de l'ingénieur, à savoir la récolte des informations, le contrôle de leur pertinence et de leur qualité, la conception d'un aménagement et de ses variantes, la détermination de la quantité d'eau qui peut être turbinée, le calcul des coûts des composants et finalement l'appréciation et l'interprétation des résultats. Dans la petite hydraulique comme dans la "grande", l'expérience démontre qu'il n'y a pas de solution standard, mais qu'il est nécessaire de tenir compte des particularités d'une installation donnée, terrain, eau, contraintes d'exploitation, exigences légales, etc.

Pour permettre la souplesse requise dans le travail de conception d'une mini-centrale et pour que le concepteur n'ignore rien des calculs qui sont effectués, le programme MiniHydro est volontairement très simple et ne comporte pas d'interface raffinée; l'utilisateur qui connaît tant soit peu les fonctions de base d'Excel n'aura pas de difficulté à comprendre ce qui se passe, par quelles formules sont obtenus les résultats, et à modifier ce qui ne convient pas à la situation qu'il est en train de traiter. Dans les cas les plus courants, il lui suffira de mettre les données particulières dans les cases marquées en bleu, et les textes ou chiffres fixes ainsi que les résultats apparaîtront dans les cases blanches. Celles-ci ont un accès protégé pour éviter les fausses manipulations, mais cette protection peut être levée (sans mot de passe) si l'on désire apporter une modification quelconque; après quoi, la protection peut être réactivée. En outre, la plupart des axes des diagrammes peuvent être adaptés par un simple clic sur le bouton droit de la souris.

Comme nous venons de le dire, le programme MiniHydro a été conçu comme une aide à la réalisation d'une étude sommaire, mais il ne libère pas son utilisateur de l'obligation de comprendre ce qu'il fait et de contrôler le bien-fondé de ses données. Le programme a été écrit de la manière la plus claire et la plus transparente possible ; en outre, tous les modifications, adaptations ou compléments que peuvent désirer ses utilisateurs peuvent lui être apportés sans difficulté et sans limite. Par conséquent, l'utilisateur est seul et unique *responsable* de l'exactitude, de la pertinence et de la qualité des résultats qu'il obtient à l'aide de MiniHydro.

Notation *Bezeichnungen*

<i>A</i>	m^2	Aire, surface, section <i>Fläche, Querschnitt</i>
<i>a</i>	–	Facteur d'annuité <i>Annuitätsfaktor</i>
<i>C</i>	m / s	Vitesse absolue <i>Absolutgeschwindigkeit</i>
<i>D</i>	m	Diamètre <i>Durchmesser</i>
DN	mm	Diamètre nominal d'une conduite <i>Nenn Durchmesser eines Rohres</i>
<i>g</i>	m / s^2	= 9,81 m / s^2 Accélération de la pesanteur, gravité <i>Erdbeschleunigung</i>
<i>H</i>	m	Chute nette <i>Nettofallhöhe</i>
<i>H_b</i>	m	Hauteur de chute brute <i>Bruttofallhöhe</i>
<i>K</i>	mm	Rugosité de sable équivalente <i>Äquivalente Sandrauigkeit</i>
<i>L</i>	m	Longueur <i>Länge</i>
<i>m</i>	années	Durée d'un emprunt <i>Dauer einer Anleihe</i>
<i>n</i>	$1 / \text{s}$	Vitesse de rotation <i>Drehzahl</i>
<i>n'</i>	$1 / \text{min}$	Vitesse de rotation <i>Drehzahl</i>
<i>P</i>	W	Puissance mécanique <i>Mechanische Leistung</i>
<i>P_{el}</i>	W	Puissance électrique <i>Elektrische Leistung</i>
<i>P_h</i>	W	Puissance hydraulique <i>Hydraulische Leistung</i>
<i>p</i>	$\text{N} / \text{m}^2 = \text{Pa}$	Pression <i>Druck</i>
PN	bar	Pression nominale d'un tuyau <i>Nenn Druck eines Rohres</i>
<i>Q</i>	m^3 / s	Débit volumique <i>Volumenstrom, Durchfluss</i> $Q \equiv \dot{V}$
<i>r</i>	–	Taux d'intérêt d'un emprunt <i>Zins einer Anleihe</i>
Re	–	Nombre de Reynolds <i>Reynolds-Zahl</i> $\text{Re} = \rho C L / \mu$
<i>T</i>	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	Température <i>Temperatur</i>
<i>t</i>	s	Temps <i>Zeit</i>

U	m	Périmètre mouillé <i>Benetzter Umfang</i>
Z	m	Coordonnée verticale, altitude <i>Vertikale Koordinate, Höhe</i>
$\Delta \dots$...	Différence, accroissement <i>Differenz, Zuwachs</i>
ΔH_r	m	Perte de charge <i>Energieverlust</i>
Δt	s	Intervalle de temps <i>Zeitintervall</i>
ζ	–	Coefficient de perte de charge singulière <i>Widerstandszahl</i>
η	–	Rendement <i>Wirkungsgrad</i>
λ	–	Coefficient de perte de charge linéaire <i>Rohrreibungszahl</i>
μ	N s / m ²	Viscosité dynamique <i>Dynamische Viskosität bzw. Zähigkeit</i>
ν	m ² / s	Viscosité cinématique <i>Kinemat. Viskosität bzw. Zähigk. $\nu = \mu / \rho$</i>
v	–	Vitesse spécifique, chiffre de vitesse <i>Spezifische Drehzahl, Laufzahl</i>
ρ	kg / m ³	Masse spécifique <i>Dichte, spezifische Masse</i>
ω	rad / s	Vitesse angulaire <i>Winkelgeschwindigkeit</i>

1 Débits à disposition

1.1 Types d'eaux turbinables

L'eau qui est turbinée dans une petite centrale et dont on tire l'énergie électrique peut avoir plusieurs provenances:

- 1) *Cours d'eau*. L'eau d'une rivière ou d'un torrent peut être déviée de son lit et amenée à une turbine. En ce cas, le débit turbiné variera plus ou moins fortement en fonction des saisons, des précipitations et de la température. En outre, il faut tenir compte des exigences légales sur lesquelles nous reviendrons au paragraphe 1.4.

- 2) *Eau potable*. C'est là l'un des cas les plus avantageux pour une petite centrale parce qu'une grande partie de l'équipement, captage, conduite, réservoir en particulier, servent d'abord aux besoins de l'alimentation en eau potable et doivent être construits de toute façon, même si l'eau n'est pas turbinée. Ainsi, la centrale hydro-électrique ne doit couvrir que les coûts supplémentaires qu'elle engendre. Cependant, la sécurité de l'alimentation en eau potable doit être garantie, même au cas où le réseau électrique est hors tension ou si la turbine est en panne ou en révision. En outre, souvent, il est nécessaire de dimensionner l'aménagement pour le débit maximal fourni par les sources pour ne pas perdre d'eau, sachant que ce qui serait déversé près des sources devrait être acheté ailleurs ou pompé dans une nappe phréatique.

- 3) *Eau usée*. Dans ce cas aussi, une grande partie de l'équipement ne sert pas qu'au turbinage et n'est donc pas à sa charge. Selon la disposition, la turbine peut se situer dans la centrale d'épuration, avant que les eaux usées soient traitées, ou plus en aval, après traitement, juste avant la restitution à un cours d'eau. Reste à résoudre les problèmes tenant aux débits variant fortement au cours d'une journée à cause des fluctuations de la demande en eau ou à cause des orages, si les eaux dites claires, c'est-à-dire celles provenant des eaux de pluie récoltées par les bouches d'égouts, ne sont pas séparées des eaux salies par les habitants ou l'industrie. Ce problème peut être résolu ou atténué grâce à un bassin de compensation accumulant les eaux pendant un certain temps avant qu'elles soient envoyées à la turbine. En outre, lorsque les eaux traversant la turbine n'ont pas encore été épurées, il faut les filtrer, par une grille et un système de tamisage, de manière à éliminer les déchets solides qui pourraient rester coincés dans les sections rétrécies de la machine, et il faut prévenir la formation de couches de matières grasses sur les parois des conduites.

- 4) *Eau d'irrigation*. Pour arroser les cultures, on installe quelquefois des conduites amenant de l'eau d'endroits situés en altitude. Là aussi, les conduites doivent être posées et financées en tous les cas et elles peuvent être adaptées au turbinage. D'une part, il est possible de tirer partie de la pression excédentaire, c'est-à-dire de celle qui n'est pas nécessaire pour les jets d'aspersion, en installant une turbine un peu en amont du système de distribution de l'eau d'irrigation. D'autre part, au cas où l'eau n'est pas utilisée durant des périodes assez longues mais reste disponible, la turbine peut aussi être placée au bas de l'installation, juste avant la restitution à un cours d'eau.

- 5) *Eau de canons à neige*. Pour garantir l'enneigement des pistes de ski lorsque les chutes de neige ne sont pas suffisantes, on installe de plus en plus souvent de vastes installations comprenant des captages, des réservoirs de stockage et des conduites de distribution. Là aussi, lorsque l'eau disponible n'est pas utilisée pour faire de la neige, les installations peuvent servir à amener cette eau à une turbine placée en leur point inférieur, cela pour autant qu'elles aient été dimensionnées dans ce but.

- 6) *Eau de dotation*. Lorsqu'un barrage est construit au travers d'une rivière, la loi impose de ne pas assécher le cours d'eau mais de laisser passer ce qu'on appelle un débit de dotation ou débit résiduel. Lorsque le barrage en question est haut, l'eau qui est lâchée à sa base possède une énergie qui peut servir à actionner une turbine. Et là aussi, une grande partie de l'installation sert à d'autres buts que la mini-centrale, ce qui réduit les coûts.

- 7) *Eau d'un processus industriel*. Dans les installations industrielles, en particulier celles du génie chimique, il n'est pas rare d'avoir besoin d'eau, ou de tout autre liquide, sous pression pour une opération ou une autre. A la sortie d'un tel processus, il se peut que la pression soit encore élevée mais ne soit plus utile; au lieu de dissiper cette énergie dans un réducteur de pression, on peut alors en tirer partie dans une turbine.

Dans toutes les installations que nous avons mentionnées, il importe de bien dimensionner ses éléments en tenant compte du turbinage: les conduites en particulier doivent pouvoir supporter la pression et ne doivent pas causer de pertes d'énergie élevées. Ces aménagements ont en effet été conçus pour d'autres buts que la production d'énergie et, la plupart du temps, ne sont pas utilisables pour cela mais doivent être plus ou moins profondément adaptés.

1.2 Débits au cours d'une année, débits classés

La quantité d'eau disponible pour le turbinage a une influence directe sur la quantité d'énergie que peut produire un aménagement et il est par conséquent très important de la déterminer le plus précisément possible. Cette quantité d'eau varie bien sûr d'une heure à l'autre, d'un jour à l'autre, d'un mois à l'autre et aussi d'une année à l'autre, cela en fonction des précipitations qui alimentent sources ou cours d'eau, en fonction de la température qui favorise la fonte de la neige, ou en fonction des besoins des utilisateurs de l'eau. Il n'est donc pas possible de prédire de façon exacte les débits turbinables à un instant donné. Il n'est pas nécessaire non plus de connaître l'évolution heure par heure, mais, en général, des *moyennes mensuelles* sont suffisantes pour calculer de façon fiable l'énergie qui pourra être produite en une année.

Les données sur lesquelles on pourra se baser pour déterminer les débits mensuels moyens peuvent différer fortement en quantité et en qualité. Dans les cas les plus favorables, on dispose de mesures effectuées régulièrement durant plusieurs années, par exemple tous les jours ou éventuellement même tous les quarts d'heure. Il est alors facile de former des valeurs mensuelles moyennes (fig. 1.1 et 1.2), le cas échéant en éliminant des chiffres douteux ou extrêmes; par exemple, l'année 2003, qui a été très chaude et très sèche, n'est pas représentative d'une année typique. Dans d'autres cas, les mesures n'ont été effectuées que durant une seule année ou présentent des lacunes; il s'agira alors d'essayer de les combler en extrapolant prudemment les mesures dont on dispose. Dans certains cas, il est possible aussi que

seules soient connues les valeurs maximale Q_{\max} et minimale Q_{\min} des débits. On peut alors s'inspirer d'une source ou d'un cours d'eau dont le comportement peut être supposé semblable à celui auquel on a affaire et en déduire les débits mensuels moyens; on peut par exemple reprendre les variations données par les figures 1.1 et 1.2 et augmenter ou diminuer les chiffres en proportion de ceux qui sont connus. Si rien de mieux n'est possible, on peut aussi se contenter de calculer une *valeur annuelle moyenne* définie de la manière suivante

$$Q_m = \frac{4Q_{\max} + 8Q_{\min}}{12} \quad (1.1)$$

En privilégiant les valeurs minimales, on tient compte du fait que, généralement, celles-ci sont plus fréquentes que les valeurs maximales.

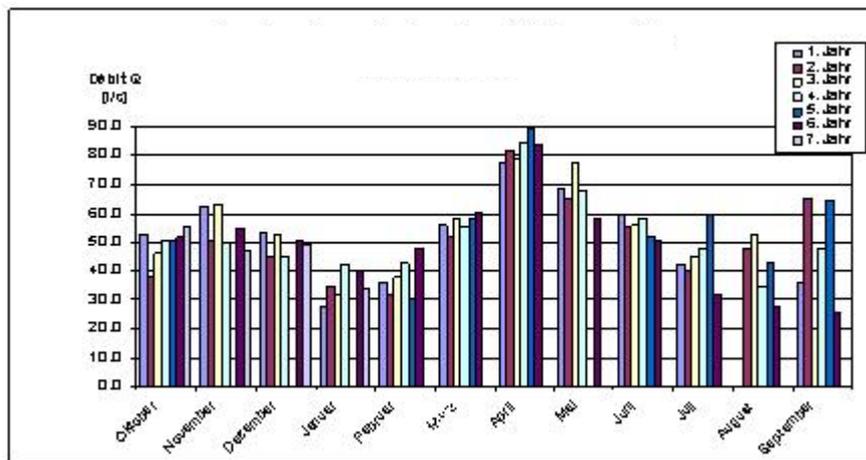


Fig. 1.1 Exemple de valeurs mensuelles moyennes du débit d'une source telles que mesurées pendant sept années (ici sur l'année hydraulique du 1er octobre au 30 septembre)

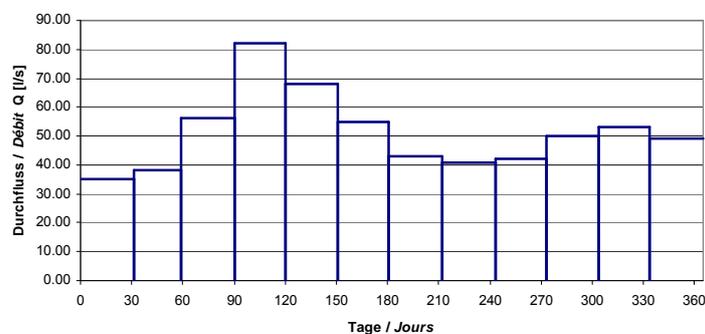


Fig. 1.2 Exemple de valeurs mensuelles moyennes du débit d'une source pendant une année: pour chaque mois, on a formé la moyenne des valeurs de la fig. 1.1

Pour avoir une meilleure vue des débits en même temps que de leur durée, on les représente aussi sous la forme de *débits classés*. On trace alors une courbe donnant le temps durant lequel un certain débit est atteint ou dépassé. De manière générale, si le débit est donné par une fonction continue $Q(t)$, on somme les intervalles de temps Δt_i pour lesquels un débit Q_i est atteint ou dépassé (fig. 1.3) et on obtient une nouvelle fonction continue. Lorsque le débit est donné par une fonction discontinue, il suffit de mettre les valeurs de débit par ordre décroissant en conservant les intervalles (fig. 1.4 et 1.5).

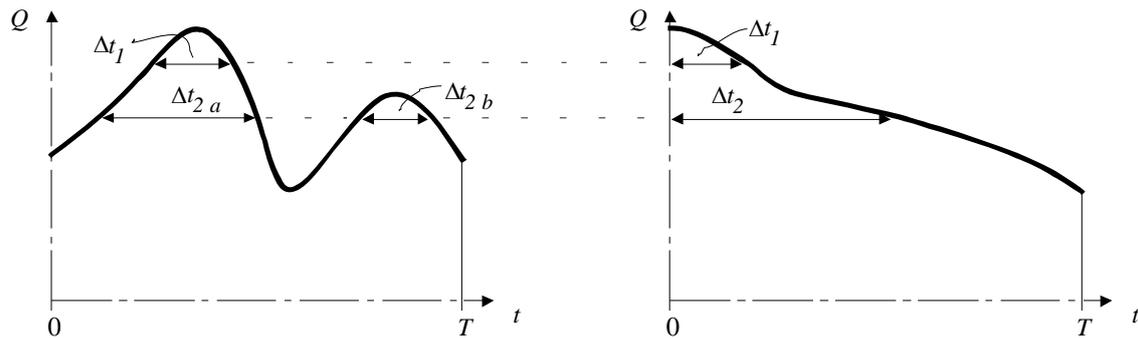


Fig. 1.3 Définition de la courbe des débits classés pour une fonction continue $Q(t)$. A gauche: courbe des débits instantanés. A droite: courbe des débits classés

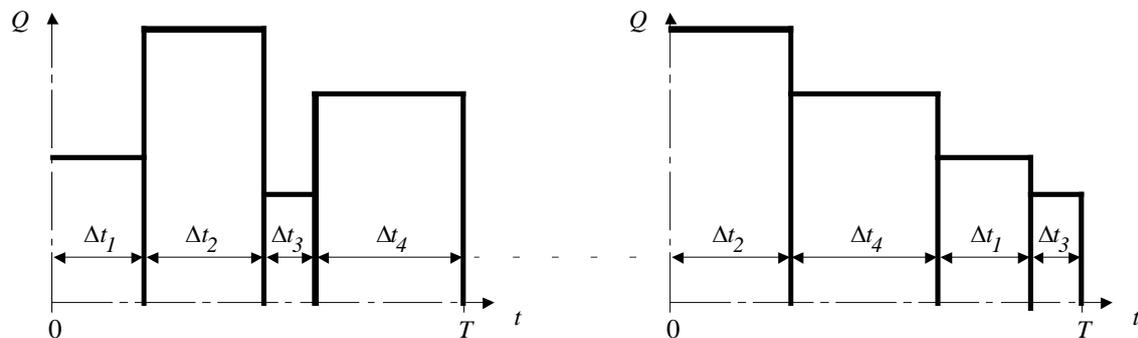


Fig. 1.4 Définition de la courbe des débits classés pour une fonction discontinue $Q_i(\Delta t_i)$. A gauche: courbe des débits instantanés. A droite: courbe des débits classés

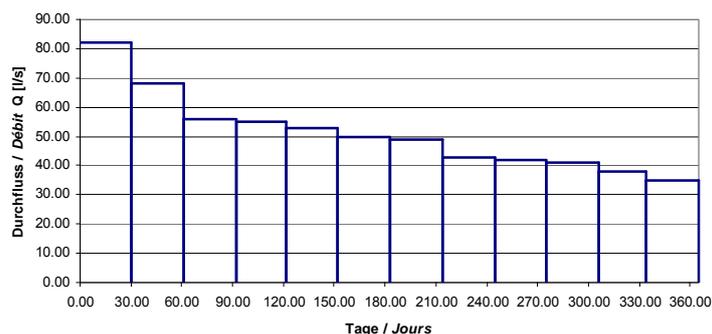


Fig. 1.5 Exemple de valeurs mensuelles moyennes du débit d'une source pendant une année; il s'agit des valeurs classées de la fig. 1.2

1.3 Choix du débit d'équipement

Sur la base des courbes précédentes, il devient possible de fixer le *débit d'équipement*, appelé aussi parfois débit nominal, de l'aménagement. Il s'agit là du débit maximal pouvant être acheminé par l'installation, c'est-à-dire passer par la conduite sans causer des pertes d'énergie inadmissibles et en principe aussi par la turbine. Pour utiliser au mieux ces éléments, et du même coup rentabiliser l'investissement consenti, il faudrait les utiliser tout le temps à leur capacité maximale. Si l'on choisit comme débit d'équipement le débit minimal, l'installation pourra fonctionner de manière permanente à plein régime, mais les pertes d'eau, eau qui ne pourra pas passer par la conduite et qui devra être déversée en son début, seront importantes; une partie de l'énergie possible ne sera donc pas produite. Si au contraire on veut pouvoir faire passer le débit maximal, il est fort possible que l'installation fonctionne durant de longues périodes avec un débit faible par rapport à ses capacités. Il s'agit donc de trouver un compromis entre ces deux extrêmes; par exemple, dans le cas des figures 1.5 et 1.2, on pourrait choisir comme débit d'équipement la valeur de 60 l/s, de telle sorte que, pendant un mois et demi environ, on ne puisse, en moyenne, pas turbiner toute l'eau à disposition.

Souvent cependant, en particulier dans les installations utilisant de l'eau ayant d'autres usages que celui de produire de l'énergie, il faut respecter d'autres conditions. Par exemple, s'il s'agit d'eau potable, le service des eaux exigera probablement de laisser passer toute l'eau fournie par les sources, cela pour minimiser l'achat ou le pompage d'eau complémentaire; ou, dans une installation d'eau usée, il ne sera pas possible de déverser de l'eau au départ de la conduite. Dans ce genre de situations, si les débits les plus élevés sont rares, on peut aussi prévoir de les faire descendre par la conduite, laquelle sera bien sûr dimensionnée en conséquence, et de les faire passer non pas par la turbine mais par une vanne réductrice de pression placée en parallèle; de cette manière, la turbine sera utilisée au mieux, sans être surdimensionnée. Ajoutons à ce propos qu'une vanne réductrice de pression montée en by-pass de la turbine est nécessaire si l'approvisionnement en eau doit être assuré même en cas de chute du réseau électrique ou de panne de la turbine, et qu'elle est présente quel que soit le débit maximal de la turbine.

Il peut arriver aussi que, dans un réseau d'eau potable, une petite turbine soit installée en aval d'une usine de filtration, usine dont la production suit de près les besoins des consommateurs à cause du prix d'un tel traitement. Il n'est alors plus possible d'exploiter la totalité de l'eau fournie par les sources, mais il faut que la turbine s'adapte elle aussi à la consommation. Celle-ci présente habituellement l'avantage de ne varier que peu au cours d'une année, mais elle a l'inconvénient de différer entre le jour et la nuit (compter avec des pointes de 15 à 25 % plus hautes que la moyenne mensuelle). En outre, dans ce genre de cas, il faut également prendre en compte un éventuel développement des zones approvisionnées par l'usine de filtration durant la durée de vie de la turbine.

1.4 Cours d'eau: débits prélevables et débits résiduels

Lorsque l'eau destinée à être turbinée provient d'un "cours d'eau à débit permanent", c'est-à-dire dont le débit n'est pas nul au moins 347 jours par année, la Loi fédérale sur la protection des eaux [9.6] impose l'obtention d'une autorisation de prélèvement, et elle interdit de détourner des quantités d'eau telles que les biotopes naturels en souffrent ou que d'autres usages du cours d'eau ne puissent plus être garantis. Concrètement, l'article 31 fixe la quantité d'eau minimale qui doit rester dans la rivière, à savoir ce qu'on appelle les *débits résiduels minimaux* (les *débits de dotation* étant les quantités d'eau servant à assurer les débits résiduels). Ceux-ci dépendent du débit dit Q_{347} , c'est-à-dire du "débit atteint ou dépassé 347 jours par année, dont la moyenne est calculée sur une période de dix ans et qui n'est pas influencé sensiblement par des retenues, des prélèvements ou des apports d'eau". Par exemple, si $Q_{347} \leq 60 \text{ l/s}$, le débit résiduel minimal est de 50 l/s; et si $Q_{347} \geq 60 \text{ m}^3/\text{s}$, il vaut $10 \text{ m}^3/\text{s}$. En outre, le débit résiduel doit être augmenté si la qualité des eaux superficielles n'est pas suffisante, si l'approvisionnement en eau potable en aval n'est plus assuré ou si la faune et la flore en souffrent. Par contre, le débit résiduel peut être réduit sur décision du canton, en particulier "sur un tronçon de 1'000 m en aval du point de prélèvement, lorsque le cours d'eau est situé à une altitude supérieure à 1'700 m et que son débit Q_{347} est inférieur à 50 l/s" ou "lorsque les prélèvements sont opérés dans des eaux non piscicoles et à condition que le débit restant représente au moins 35 % du débit Q_{347} ".

1.5* La page "Débit" du programme MiniHydro

Sur cette page peuvent être introduites (dans les cases marquées en bleu) douze valeurs du débit turbiné Q , à savoir une valeur moyenne pour chaque mois de l'année. Sur la base de ces chiffres, la courbe des débits mensuels (exemple dans la fig. 1.2) ainsi que celle des débits classés (exemple dans la fig. 1.5) sont dessinées. En outre, si le débit turbiné doit être comparé à un autre débit, par exemple un débit total dont une partie serait déversée, il est possible d'indiquer cet autre débit Q_2 pour chaque mois d'une année, les deux débits étant représentés dans un diagramme supplémentaire. Le débit Q est donc celui qui va servir à calculer l'énergie électrique produite alors que le débit Q_2 ne sert, si besoin est, qu'à titre informatif.

Les durées des mois en jours sont déjà introduites dans le programme et sont reportées en abscisse. Si l'on désire modifier l'ordonnée, il suffit de positionner la souris près d'elle et de cliquer sur le bouton droit; il est alors possible de changer les valeurs prises par défaut pour fixer l'échelle.

2 Conduite, pertes de charge, chute, autres ouvrages hydrauliques

2.1 Pertes d'énergie dans une conduite

Dans une conduite d'eau, de même d'ailleurs que dans les câbles électriques, se produisent des pertes d'énergie qui sont loin d'être négligeables et qu'il importe donc de déterminer avec précision pour connaître la quantité d'énergie, et par suite aussi le revenu, que l'on peut attendre d'une petite centrale. Ces pertes sont nommées *pertes d'énergie*, *pertes de pression* ou aussi, par un terme d'origine plus ancienne mais toujours en usage, *pertes de charge*. Elles sont dues, d'une part, au frottement du fluide contre les parois et, d'autre part, à la viscosité de ce fluide.

Notons tout d'abord que la *masse spécifique* ρ de l'eau varie faiblement avec la température T , ce qui peut être décrit entre 0 et 30 °C par la formule (établie sur la base des valeurs données dans [5.5], p. 1.5), en kg/m^3 et avec T en °C

$$\rho = 999,87 + 0,0655 \cdot T - 8,46875 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 5,46875 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad (2.1)$$

La *viscosité dynamique* μ (avec pour unité le N s / m^2 par exemple) d'un fluide varie quant à elle assez fortement avec la température. Dans ce qui suit, nous n'aurons pas besoin de cette viscosité dynamique, qui est une propriété physique première d'un fluide, mais de la viscosité dite *viscosité cinématique*, laquelle est définie par le rapport

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

et pour la variation de laquelle en fonction de la température nous avons, en m^2 / s et avec T en °C (selon [2.1], éq. (1.23))

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2} \quad (2.3)$$

Ces propriétés de l'eau étant connues, nous avons encore besoin de définir une autre grandeur, laquelle caractérise le rapport entre les forces dues à la masse du fluide et celles dues à la viscosité. Ce nombre sans dimension permet de comparer entre eux deux écoulements semblables quant aux phénomènes physiques en jeu mais différents par leur échelle, et en particulier des écoulements de fluides différents dans des conduites différentes. Il s'agit du *nombre de Reynolds* dont la définition est dans le cas des écoulements dans les conduites

$$\text{Re} = \frac{\rho C D_h}{\mu} = \frac{C D_h}{\nu} \quad (2.4)$$

où C représente la *vitesse moyenne* du fluide dans une section, à savoir en divisant le débit Q par l'aire A de la section,

$$C = Q / A \quad (2.5)$$

Quant à D_h , il désigne le *diamètre hydraulique*, lequel est identique au diamètre intérieur D d'une conduite de section circulaire mais peut, plus généralement, s'appliquer à une conduite ayant une section quelconque et en particulier à une conduite à écoulement libre fermée ou ouverte; sa définition est

$$D_h = \frac{4A}{U} \quad (2.6)$$

avec l'aire A de la section occupée par le fluide et U , le *périmètre mouillé*, c'est-à-dire la longueur du périmètre de la section en contact avec le fluide (fig. 2.1)

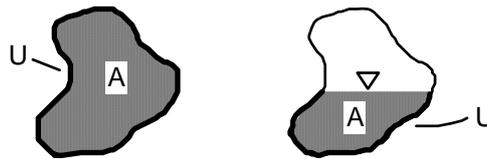


Fig. 2.1 Définition du diamètre hydraulique d'une conduite entièrement ou partiellement remplie de liquide

Pour exprimer la perte d'énergie dans une conduite de longueur L , on se sert généralement de l'expression suivante, appelée parfois *formule de Darcy-Weisbach*,

$$\Delta H_r = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{C^2}{2g} \quad (2.7)$$

où g désigne l'*accélération de la pesanteur* ($= 9,81 \text{ m/s}^2$) et où λ est le *coefficient de perte de charge linéaire*. La perte de charge ΔH_r est ici mesurée en termes de hauteur de colonne du liquide circulant dans la conduite, donc en particulier en mètres de colonne d'eau ou en abrégé mCE. L'énergie perdue est égale à celle d'un kilogramme-poids descendant, dans le champ de la pesanteur, de la hauteur ΔH_r . Le coefficient λ est une grandeur sans dimension qui dépend des caractéristiques du fluide, à savoir du nombre de Reynolds que nous venons de voir, et de la rugosité K des parois de la conduite. Cette dernière grandeur reflète les aspérités présentes sur la paroi intérieure de la conduite qui freinent l'écoulement du fluide et a une unité de longueur; en fait, elle n'est pas une mesure directe de la hauteur de ces aspérités, mais, à la suite d'essais comparatifs, elle représente une *hauteur de sable équivalente*, c'est-à-dire la hauteur de grains de sable qui seraient collés sur une paroi lisse et produiraient les mêmes pertes que les aspérités réelles de la paroi (fig. 2.2). De par sa définition, cette

grandeur ne peut donc être mesurée directement sur une conduite mais doit être tirée de tables, telles que celle de la figure 2.3, ou de la documentation des fournisseurs de tuyaux.



Fig. 2.2 Définition de la hauteur de sable équivalente K pour mesurer la rugosité d'une paroi

Tuyau	Etat	K [mm]
étiré ou extrudé, en cuivre, laiton, bronze, aluminium, verre, plastique	neuf, techniquement lisse	0,001 ... 0,0015
caoutchouc	neuf, techniquement lisse	~ 0,0016
fonte	neuf	0,25 ... 0,5
	légèrement rouillé	1,0 ... 1,5
	très rouillé	1,5 ... 5,0
acier	neuf, sans soudure	0,02 ... 0,06
	neuf, soudure axiale	0,04 ... 0,1
	légèrement rouillé	0,15 ... 0,4
	très rouillé	2,0 ... 4,0
	avec bitume	~ 0,05
	avec ciment	~ 0,18
béton	lisse	0,3 ... 0,8
	moyen	1,0 ... 2,0
	rugueux	2,0 ... 3,0

Fig. 2.3 Hauteur de sable équivalente K pour quelques matériaux (d'après "Dubbel", [2.7], § B 6.2.2)

Comme nous venons de le dire, le coefficient λ est une fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité de sable équivalente. Sur la base de mesures en laboratoire effectuées par Nikuradse, Colebrook a proposé la formule suivante qui porte son nom

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + 0,27 \frac{K}{D_h} \right) \quad (2.8)$$

où \log désigne le logarithme de base 10. Comme on le voit, cette formule un peu compliquée contient l'inconnue λ des deux côtés du signe égal et nécessite une itération jusqu'à ce que

les termes de gauche et de droite soient égaux. Si l'on représente graphiquement cette fonction, on obtient les courbes de la figure 2.4, dans toute sa partie droite appelée domaine turbulent. La formule (2.8) présente le grand avantage d'être valable pour toutes les vitesses d'écoulement (si l'on excepte les écoulements laminaires, très lents et pratiquement inexistantes avec de l'eau) et pour toutes les rugosités, de zéro aux plus élevées.

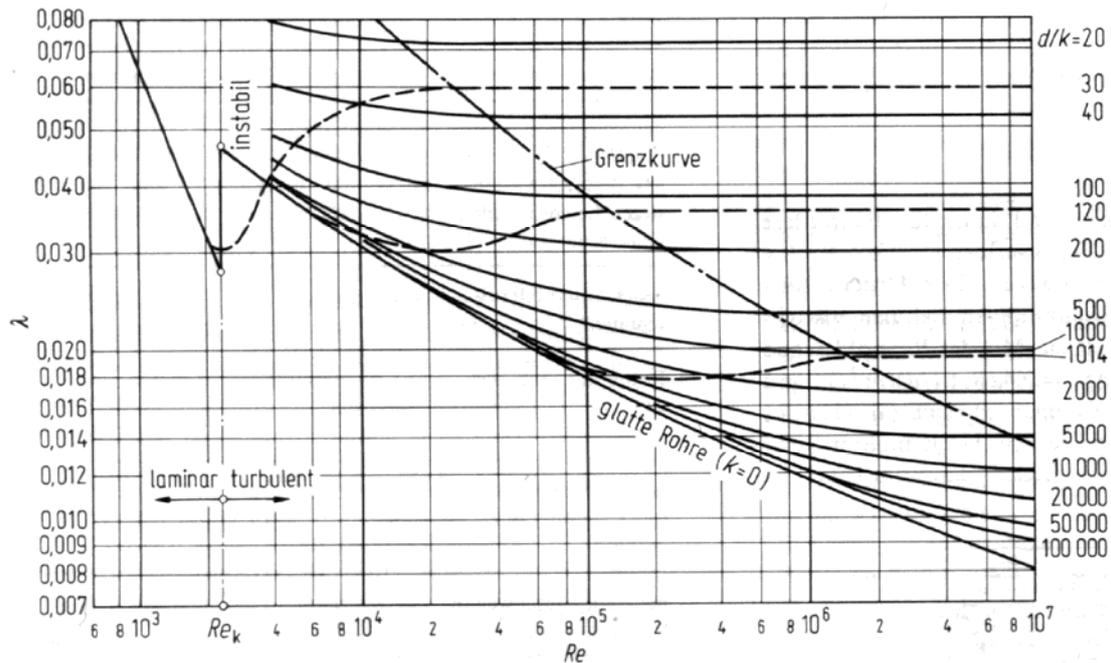


Fig. 2.4 Diagramme de Moody (ou de Colebrook-Nikuradse) (d'après "Dubbel", [2.7], § B 6.2.2). Dans le domaine turbulent, les lignes pleines correspondent à la formule de Colebrook (valable dans tout le domaine) et les lignes traitillées, aux mesures de Nikuradse

Si l'on transforme quelque peu la relation (2.7), on peut faire apparaître un fait très important. En effet, en exprimant la vitesse moyenne à l'aide du débit grâce à (2.5), en supposant que l'on ait une conduite circulaire et que l'on puisse écrire $A = \pi D_h^2 / 4$, on obtient

$$\Delta H_r = \lambda \frac{L}{D_h^5} \frac{8Q^2}{\pi^2 g} \quad (2.9)$$

Cela montre, en laissant de côté la variation de λ , d'une part, que les pertes sont proportionnelles au carré du débit et, d'autre part, qu'elles sont inversement proportionnelles à la puissance 5 du diamètre, ce qui veut dire qu'une faible variation de celui-ci entraîne une forte variation des pertes.

Pour conclure ce paragraphe, mentionnons qu'il existe d'autres formules que celle que nous avons indiquée pour calculer les pertes dans une conduite pleine ou à écoulement libre, en

particulier celles qui sont souvent utilisées en génie civil pour des canaux ouverts; comme elles sont adaptées à des parois rugueuses, elles ne conviennent pas bien aux tuyaux actuels dont les parois sont très lisses. Notons encore qu'il se produit aussi des pertes dans ce qu'on appelle les *éléments de conduite*, comme par exemple les coudes, les grilles, les embouchures, les diffuseurs, vannes, etc. En général, dans un aménagement hydraulique, ce type de pertes est négligeable par rapport aux pertes linéaires dans les conduites à cause de la grande longueur de celles-ci. Nous n'en parlerons donc pas ici et, si besoin est, nous renvoyons le lecteur à la bibliographie.

2.2 Chute brute, chute nette

L'énergie hydraulique dont dispose la turbine, et qu'elle transforme en énergie mécanique à son arbre, correspond à l'énergie qui lui est fournie à son entrée 1 moins l'énergie qu'elle doit restituer à sa sortie 2 (fig. 2.5). L'énergie en un point d'un écoulement se présente sous trois formes: une énergie potentielle due à la hauteur Z au-dessus d'une certaine référence, une énergie due à la pression p qui s'exerce sur le fluide, et une énergie cinétique liée à la vitesse C . L'énergie totale est donc donnée par la somme de ces trois termes, à savoir (tout comme dans l'équation de Bernoulli)

$$H_t = Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{C^2}{2g} \quad (2.10)$$

Dans cette expression, l'énergie est de nouveau mesurée en termes de hauteur de colonne d'eau: H_t représente la hauteur à laquelle il faudrait placer un kilogramme-poids d'eau pour que son énergie potentielle, à pression nulle et à vitesse nulle, soit la même que l'énergie totale du même kilogramme-poids sous la pression p et à la vitesse C . Si l'on calcule maintenant la différence des énergies totales à l'entrée et à la sortie de la turbine, on a

$$H = \Delta H_t = H_{t1} - H_{t2} = \left(Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{C_2^2}{2g} \right) \quad (2.11)$$

grandeur qui est appelée la *chute nette*.

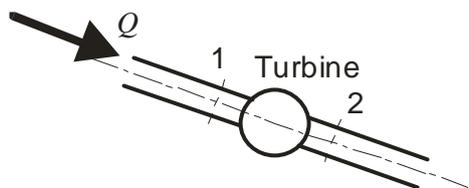


Fig. 2.5 Passage d'un débit Q de l'entrée 1 à la sortie 2 d'une turbine. Entrée et sortie correspondent en principe aux limites physiques de la machine fournie par un constructeur

La chute nette doit être distinguée de la chute brute, c'est-à-dire de la différence d'énergie entre le point haut et le point bas d'un l'aménagement; en effet, l'énergie perdue dans les conduites qui précèdent ou suivent la turbine n'est plus à sa disposition pour être transformée en énergie mécanique. Le plus souvent, ces deux points sont constitués par des bassins ouverts sur la pression atmosphérique et dans lesquels la vitesse est négligeable. La *chute brute* H_b est alors simplement donnée par la différence d'altitude des surfaces libres de l'eau dans ces bassins (fig. 2.6). Lorsqu'elle parcourt la conduite, l'eau perd au total l'énergie que nous avons appelée ΔH_r , si bien qu'il reste à la turbine la chute nette

$$H = H_b - \Delta H_r \quad (2.12)$$

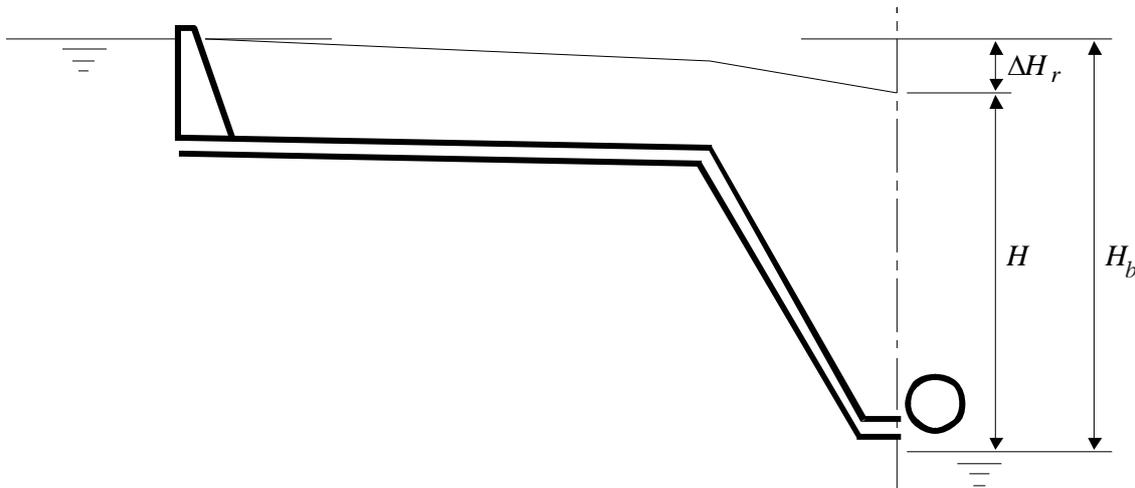


Fig. 2.6 Définitions des chutes nette H et brute H_b d'un aménagement

A propos des pertes, ajoutons encore ici qu'il n'est pas bon pour les turbines que la chute nette varie trop fortement lorsque le débit est modifié. En effet, cela dit de façon simplifiée, un changement de chute nette fait varier les vitesses à l'entrée de la machine et par conséquent la façon dont l'eau arrive sur les aubages, ce qui provoque une diminution du rendement. Selon le type de turbine, cet effet est plus ou moins marqué et donc plus ou moins néfaste. Pour une machine Pelton par exemple, une baisse de 20 % de la chute nette est tout à fait admissible du point de vue du rendement, mais elle implique bien sûr une diminution de l'énergie à disposition de la turbine.

2.3 Types de tuyaux, fouille

Les premières conduites d'eau étaient construites avec des tuyaux en bois, en céramique ou en plomb. Puis on a utilisé la fonte grise, l'éternit ou l'acier. Aujourd'hui, seuls le plastique, la fonte ductile, l'acier et plus rarement la résine renforcée de fibres de verre sont utilisés (cf. les directives [4.6]). Les dimensions sont normées, de telle sorte que l'on peut combiner des

produits de divers fabricants; on prendra cependant garde au fait que les normes sont conçues différemment pour chacun des trois matériaux mentionnés et qu'en aucun cas le diamètre intérieur ne correspond au *diamètre nominal* DN: il est plus petit pour les tuyaux en plastique, mais plus grand pour les autres matières, et varie encore selon le type de revêtement intérieur. Les tuyaux sont classés d'après ce qu'on appelle couramment leur *pression nominale* PN, c'est-à-dire plus précisément la *pression de fonctionnement admissible* (PFA), soit (cf. [4.6]) "la pression hydrostatique maximale à laquelle un composant est capable de résister de façon permanente en service". Il existe en outre une *pression maximale admissible* (PMA), soit la "pression maximale, y compris le coup de bélier, à laquelle un composant est capable de résister lorsqu'il y est soumis de façon intermittente en service", et une *pression d'épreuve admissible* sur chantier (PEA), soit la "pression hydrostatique maximale à laquelle un composant nouvellement mis en oeuvre est capable de résister pendant un laps de temps relativement court afin d'assurer l'intégrité et l'étanchéité de la conduite". Ces trois pressions sont indiquées dans les catalogues des fabricants. Une conduite doit être conçue sur la base de la pression nominale, c'est-à-dire que cette pression nominale doit être supérieure, en tout point de la conduite, à la pression présente lorsque les vannes à l'extrémité inférieure de la conduite sont fermées. Remarquons que lorsque l'eau s'écoule de manière stationnaire, la pression statique est, à cause des pertes, plus basse que la pression à l'arrêt. Lors de phénomènes transitoires, la pression peut, pendant un temps assez court, dépasser cette valeur, ce qui est pris en compte dans la pression maximale admissible. Pour la pose, les raccordements, le dimensionnement, etc., les fournisseurs mettent à disposition des brochures donnant d'utiles conseils (cf. par exemple les catalogues et sites internet [4.1] à [4.5]). Reprenons maintenant l'un après l'autre les trois matériaux les plus utilisés à l'heure actuelle.

- 1) *Plastiques*: polyéthylène (PE) ou polypropylène (PP) pour les conduites sous pression, chlorure de polyvinyle (PVC) pour les canaux à écoulement libre. Ces matériaux présentent les avantages d'être résistants à la pression, d'être insensibles à la corrosion et aux courants vagabonds et d'être légers, ce qui facilite le transport et la pose. Par contre, à partir d'un certain diamètre, les épaisseurs de paroi sont telles que leur utilisation devient difficile en pratique. Pour le matériau du type PE 100, les pressions nominales normées sont de 10 bar (PN 10) ou 16 bar (PN 16). Comme rugosité de sable équivalente, on peut prendre la valeur $K = 0,1$ mm pour tenir compte des joints pas toujours lisses, chiffre confirmé par des mesures sur une conduite ancienne; on remarquera que ce chiffre est plus élevé que les 0,001 mm qu'indique le tableau de la figure 2.3, mais plus bas aussi que les 0,25 mm donnés dans [4.1] et qui tiennent probablement compte de coudes ou d'un entartrage.

- 2) *Fonte ductile ou fonte sphéroïdale* (GJS ou anciennement GGG). Il s'agit de fonte, donc d'un alliage de fer et de plus de 2 % de carbone, fonte rendue plus ductile grâce à une faible adjonction de magnésium qui fait que le graphite forme de petites sphères plutôt que des lamelles. Pour éviter toute rouille, ces tuyaux ont un revêtement intérieur en polyuréthane (PUR), qui est particulièrement lisse (avec une rugosité $K \leq 0,01$ mm selon [4.3]) ou en mortier de ciment ($K = 0,18$ mm d'après "Dubbel", [2.7], § B 6.2.2, fig. 2.3). La paroi extérieure est en général aussi revêtue et protégée, par exemple par du zinc, du zinc et bitume, du polyuréthane ou par un alliage zinc-aluminium. Les pressions nominales des tuyaux eux-mêmes sont élevées, par exemple 85 bar pour les diamètres les plus petits, mais il faut prendre garde au fait qu'elles sont limitées par le verrouillage, à 25 bar si celui-ci est intérieur ou à 63 bar s'il est extérieur. Pour cette matière aussi, il existe des classes de pression, dont dépendent les épaisseurs de paroi.

- 3) *Acier*. Pour les pressions et les diamètres les plus élevés, on utilise des tuyaux en acier, lesquels sont recouverts, à l'intérieur comme à l'extérieur, de différents matériaux comme le mortier de ciment ou un plastique.

Les conduites sont le plus souvent enfouies, sauf s'il s'agit de conduites situées dans de fortes pentes et à haute pression. Cela exige le creusement d'une *fouille* à l'aide de machines plus ou moins grosses, le recouvrement puis la remise en état du terrain. Ces fouilles constituent un élément important d'un aménagement parce qu'elles impliquent de gros travaux et sont chères. Le terrain à traverser peut être en pente plus ou moins forte, il peut être plus ou moins dur, en roche ou en terre, et les accès peuvent être faciles s'il l'on est sur une route par exemple, ou difficiles si l'on est en montagne; en outre, la végétation, prairies, cultures, forêts, etc., et les constructions présentes, immeubles, villas, etc., influencent les travaux et imposent quelquefois des détours au tracé. Si la conduite est prévue à écoulement libre sur une partie de sa longueur, il faudra bien sûr veiller à ce qu'elle descende toujours. Si par contre elle est sous pression, des montées et des descentes sont possibles, en veillant cependant à ce que la pression, même sous l'effet des pertes, ne soit que peu au-dessous de la pression atmosphérique, sans quoi de l'air pourrait être aspiré ou l'eau pourrait localement se transformer en vapeur (phénomène dit de cavitation) et perturber le bon écoulement. Eventuellement, il peut être nécessaire de prévoir des aérations pour extraire de l'air lors du remplissage ou en laisser entrer lors d'une vidange. De même, il faut pouvoir vider la conduite de son eau.

2.4 Prise d'eau, dessableur, chambre de mise en charge, by-pass

En plus de la conduite, qui constitue souvent l'élément le plus important d'un aménagement, d'autres constructions peuvent être nécessaires pour amener l'eau à la turbine (cf. en particulier les ouvrages [2.8] et [2.11]). Premièrement, au sortir d'une source ou dans une rivière, l'eau doit être captée au moyen d'une *prise d'eau*. Celle-ci peut être placée sur le côté d'un cours d'eau ou au milieu de son lit, sous la forme de ce qu'on appelle une prise d'eau tyrolienne. Ces ouvrages doivent être conçus de telle façon qu'ils supportent les crues et ne s'obstruent pas à ces occasions. Si l'eau entraîne du limon, du sable, du gravier ou d'autres objets solides, il est nécessaire de prévoir une *grille* avec des dispositifs de nettoyage, voire un *dessableur* ou un *dégraveur*. Pour que la conduite demeure toujours pleine d'eau, il faut accumuler une certaine quantité d'eau à son entrée, de telle façon que le niveau d'eau reste toujours au-dessus de l'ouverture du tuyau; ce bassin, de quelques mètres cubes de volume seulement, est appelé *chambre de mise en charge*. Finalement, dans les installations dans lesquelles le passage de l'eau doit être assuré même lorsque la turbine est arrêtée, comme dans les systèmes d'alimentation en eau potable ou d'eau usée, il faut prévoir un *by-pass* en parallèle à la turbine.

Lors d'une étude de faisabilité, ces éléments ne doivent pas être conçus en détail, mais il est important de ne pas les oublier parce qu'ils ont une influence sur la conception de l'aménagement et sur la disposition de ses éléments. En outre, leur prix est souvent loin d'être négligeable.

2.5* La page "Conduite" du programme MiniHydro

Sur cette page est calculée ce qu'on appelle la *caractéristique de la conduite*, c'est-à-dire la courbe donnant la chute nette en fonction du débit (fig. 2.7). Cela se fait avec les équations que nous avons expliquées ci-dessus pour chacun des douze débits mensuels introduits à la page "Débit" et pour les débits supplémentaires indiqués sur la page "Conduite", ces débits permettant, si besoin est, d'obtenir plus de points de la caractéristique dans les faibles débits ou au-delà du débit mensuel maximal.

La conduite est supposée avoir une section circulaire et être remplie d'eau. Pour chacun des tronçons qui la constituent, il faut indiquer sa longueur, son diamètre intérieur, sa matière, cela à titre indicatif seulement, la rugosité de sable équivalente des parois, la chute brute ainsi que la température de l'eau, cela pour le calcul de sa masse spécifique et de sa viscosité. Pour modifier les échelles des axes, il suffit de cliquer sur le bouton droit de la souris et de changer les valeurs par défaut choisies par Excel.

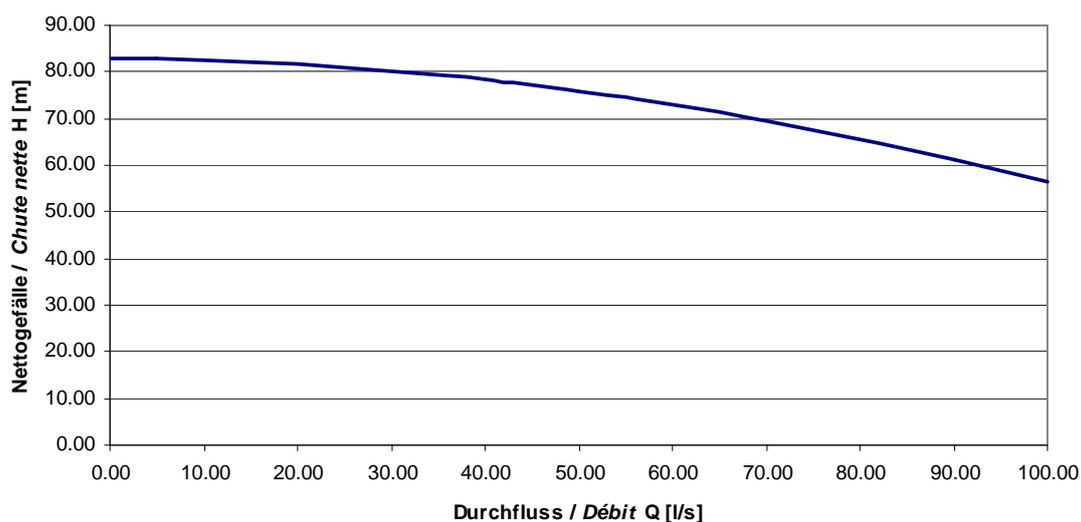


Fig. 2.7 Exemple de caractéristique d'une conduite en polyéthylène, longueur $L = 650$ m, DN 250, diamètre intérieur $D = 204,6$ mm, rugosité $K = 0,1$ mm. A débit nul, la chute nette est égale à la chute brute, ici $H_b = 83$ m, et, par suite des pertes, la chute nette H diminue approximativement avec le carré du débit

Afin de tenir compte des soutirages ou piquages que l'on rencontre parfois le long d'une conduite destinée au turbinage, un *débit supplémentaire* peut être ajouté au débit turbiné pour chaque tronçon de conduite, cela dans les cases bleues de la dernière ligne du tableau. Ce débit supplémentaire est supposé constant, c'est-à-dire qu'il ne dépend pas du débit turbiné, et il est inclus dans le calcul des pertes de charge.

3 Calcul de l'énergie produite

3.1 Energie totale produite en une année

Lorsque le débit traversant l'installation ainsi que la chute nette sont connus, il est possible de calculer l'énergie qui peut être produite par l'installation en question. Définissons tout d'abord la puissance hydraulique, c'est-à-dire la puissance contenue dans l'eau et qui est à disposition de la turbine pour qu'elle la transforme en puissance mécanique à son arbre. Comme nous l'avons dit, la chute nette H représente l'énergie totale contenue dans un kilogramme-poids d'eau. En multipliant cette grandeur par le nombre de kilogrammes-poids passant par seconde, on obtient la *puissance hydraulique*

$$P_h = \rho Q g H \quad (3.1)$$

où, comme précédemment, $\rho = 1'000 \text{ kg/m}^3$ représente la masse spécifique de l'eau et $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, l'accélération de la pesanteur. Si l'on préfère, en termes un peu plus modernes, on peut dire aussi que ρQ est le débit massique traversant la machine et $g H$, l'énergie spécifique ou massique contenue dans un kilogramme-masse d'eau.

En tenant compte du rendement global de la machine hydraulique η_t , on obtient la *puissance mécanique* fournie à l'arbre de la turbine

$$P = \eta_t P_h = \eta_t \rho Q g H \quad (3.2)$$

Le rendement d'une bonne mini-turbine vaut environ 80 % à 90 %, selon les conditions de débit et de chute sous lesquelles elle fonctionne. En tenant compte en outre du rendement η_g de la génératrice électrique, lequel atteint de 80 % à 95 %, on obtient la *puissance électrique* aux bornes de la machine électrique, à savoir

$$P_{el} = \eta_g P = \eta_g \eta_t P_h = \eta_g \eta_t \rho Q g H \quad (3.3)$$

ou avec le rendement total η des deux machines prises ensemble

$$P_{el} = \eta P_h = \eta \rho Q g H \quad (3.4)$$

Si l'on dispose d'indications précises sur les rendements η_t et η_g des deux machines aux divers points de fonctionnement, c'est-à-dire en fonction des débits et chute pour la turbine, et de la puissance pour la génératrice, on peut calculer précisément la puissance électrique pour chaque mois de l'année. Comme, au stade de l'étude préliminaire, on n'a le plus souvent pas encore de données détaillées sur les machines, et comme en outre il faut tenir compte d'éventuelles interruptions pour cause de chute du réseau électrique, de révision ou de panne d'un élément de la centrale, ou encore de réparation aux conduites, on peut simplement admettre le

rendement moyen relativement pessimiste de $\eta = 70 \%$ (comme proposé dans [0.2], p. 17 et p. 81) et le supposer constant; on obtient ainsi une estimation simple et prudente.

Lorsque l'installation fonctionne pendant l'intervalle de temps Δt à la puissance P_{el} , elle produit l'énergie électrique

$$E_{el} = P_{el} \Delta t \quad (3.5)$$

L'énergie produite annuellement par la centrale correspond à la somme des énergies mensuelles produites en tenant compte des différents débits mensuels moyens et des chutes nettes déterminés comme nous l'avons expliqué aux chapitres 1 et 2.

En plus de l'énergie électrique produite en une année, qui nous servira à calculer le revenu gagné grâce à la vente du courant électrique, nous avons besoin encore, cela pour dimensionner correctement le raccordement au réseau électrique, de la *puissance électrique maximale* fournie par l'installation à débit maximal. Celle-ci se calcule également à l'aide des formules (3.3) ou (3.4), mais en prenant cette fois des rendements moins pessimistes pour ne pas risquer de sous-dimensionner les câbles, à savoir par exemple $\eta = 75 \%$ pour une petite machine et $\eta = 85 \%$ si l'on est au-delà de 200 kW.

En outre, pour pouvoir fournir les indications demandées pour obtenir les rétributions prévues par les textes légaux, on a besoin de la *puissance annuelle moyenne*, laquelle est appelée "puissance équivalente" dans l'Ordonnance sur l'approvisionnement en électricité, cf. [9.5], appendice 1.1); celle-ci correspond à la puissance électrique d'une machine qui fonctionnerait toute l'année, soit 8760 h, à régime constant en produisant l'énergie annuelle obtenue ci-dessus et se détermine par, si E_{el} est exprimé en kWh,

$$P_m = \frac{E_{el}}{8760h} \quad [\text{kW}] \quad (3.6)$$

Finalement, on a besoin encore de la *puissance brute moyenne* ou *puissance théorique moyenne de l'eau*, c'est-à-dire en fait de la puissance que l'on aurait, avec les "quantités d'eau débitées effectivement par le cours d'eau, jusqu'à concurrence du débit maximum que peuvent absorber les installations," s'il n'y avait aucune perte ni dans les conduites ni dans les machines (cf. art. 51 de la Loi fédérale sur l'utilisation des forces hydrauliques [9.1]; cette puissance est appelée "puissance mécanique brute moyenne" dans le formulaire d'annonce [9.8] pour la rétribution à prix coûtant); en d'autres termes, il s'agit là de la puissance que nous pourrions appeler hydraulique brute, ou encore de la puissance disponible dans la nature. Elle se calcule sur la base de la chute brute et sans les rendements mentionnés ci-dessus. On a tout d'abord pour la puissance instantanée

$$P_b = \rho Q g H_b \quad (3.7)$$

puis pour l'énergie pendant un intervalle Δt

$$E_b = P_b \Delta t = \rho Q g H_b \Delta t \quad (3.8)$$

et finalement, après sommation sur les mois d'une année, pour la puissance brute moyenne cherchée

$$P_{bm} = \frac{E_{b\text{ annuel}}}{8760\text{h}} \quad [\text{kW}] \quad (3.9)$$

3.2* La page "Energie" du programme MiniHydro

Sur cette page est calculée l'énergie électrique totale produite en un an sur la base des débits mensuels moyens turbinables indiqués à la page "Débit". Pour chaque débit mensuel, la chute nette correspondante est prise en compte, et cela en tenant compte des pertes causées par d'éventuels débits supplémentaires indiqués à la page "Conduite".

En outre, le débit d'équipement indiqué par l'utilisateur influence les résultats: s'il est supérieur au débit turbinable maximal, un avertissement apparaît mais le calcul de l'énergie se fait bien avec les débits moyens de la page "Débit", comme on peut le vérifier dans le tableau récapitulatif du débit et la chute nette de chaque mois. Si par contre le débit d'équipement est inférieur à l'un ou l'autre débit mensuel moyen, ce débit d'équipement est considéré comme le débit maximal passant par la conduite et la turbine, et cela provoque une diminution des débits mensuels concernés, une adaptation de la chute nette et par conséquent une modification de l'énergie produite; l'avertissement déjà mentionné apparaît ici aussi. Au cas où, pour des raisons d'alimentation en eau potable, on désire acheminer par la conduite un débit plus élevé que le débit maximal turbinable et en faire passer une partie par le by-pass, l'utilisateur doit intervenir "manuellement": il faut calculer à la page "Conduite" la chute nette pour le débit total empruntant la conduite en se servant du débit supplémentaire (celui-ci ne varie pas chaque mois) et insérer ensuite cette chute nette en lieu et place de la chute nette déterminée automatiquement dans le tableau de la page "Energie". Ce genre de situation concerne en général au plus un ou deux mois de l'année. Comme les autres mois ne sont pas affectés par ces débits supplémentaires, il ne faut pas oublier de les effacer ensuite sur la page "Conduite".

Finalement, les diverses puissances que nous avons définies au paragraphe précédent sont déterminées automatiquement. L'utilisateur doit cependant introduire les rendements nécessaires à ces calculs.

4 Raccordement au réseau électrique et signal de commande

Afin d'être rétribué par la société électrique locale ou par tout autre exploitant susceptible de reprendre l'énergie issue de la petite centrale, le courant électrique produit doit être injecté sur le réseau interconnecté. Pour ce faire, la centrale peut être reliée au réseau électrique par le biais d'une connexion à basse ou à moyenne tension, et cela en fonction de la puissance maximale de l'alternateur, de la distance de l'installation au réseau ainsi que du coût éventuellement favorable de l'une ou l'autre de ces connexions. Bien que la liaison d'une petite centrale au réseau à moyenne tension comporte inévitablement une liaison à basse tension entre son alternateur et son transformateur, nous distinguerons tout de même les deux niveaux de tension de raccordement car ils n'impliquent pas les mêmes infrastructures, ni les mêmes calculs de dimensionnement et encore moins les mêmes investissements à charge du projet.

4.1 Câbles et équipements nécessaires au raccordement à basse tension

La petite centrale peut être raccordée au réseau à *basse tension* par un *câble* souterrain (il s'agit en fait d'un conducteur entouré d'une isolation, qui est souvent appelé simplement un câble) ou une *ligne* aérienne (conducteur non isolé souvent appelé ligne). Il arrive également que l'on installe des câbles aériens, notamment quand un obstacle tel qu'une rivière doit être franchi et que le reste du tracé consiste déjà en un câble enterré. Pour diverses raisons, telles que la sécurité ou l'aspect paysager, on favorise le câble souterrain. A ce propos, notons que les fouilles effectuées pour les conduites d'eau peuvent quelquefois servir au câble de raccordement au réseau électrique.

Afin qu'une liaison à basse tension, c'est-à-dire qui ne nécessite pas d'installer de transformateur à proximité voire à l'intérieur de la centrale, puisse être effectuée entre l'alternateur et le réseau électrique interconnecté, les pertes engendrées par le courant circulant dans les conducteurs doivent être acceptables. Elles se traduisent par une *chute de tension* qu'il est nécessaire de limiter à une valeur maximale admissible, souvent fixée à 5 % de la tension nominale du réseau, lorsque la centrale fonctionne à pleine puissance. Le choix d'un câble adapté permet donc de limiter cette chute de tension maximale entre le réseau et la petite centrale. Quelquefois, le câble de la centrale peut être connecté à un câble existant, lui-même relativement éloigné du reste du réseau. En ce cas, il convient de tenir compte de la succession de ces deux câbles afin de calculer la chute de tension totale maximale pouvant être provoquée par le courant injecté. Vu que les puissances électriques sont généralement supérieures à 10 kW environ, on prend systématiquement en compte une connexion triphasée. Le câble, ayant trois conducteurs de phases d'une section de 10 à 300 mm² chacun, possède aussi un conducteur concentrique servant notamment au raccordement du point neutre, raccordement indispensable si l'on ne veut exploiter qu'une seule phase pour alimenter les divers équipements électriques de la centrale. Pour des *tensions nominales* U_N en V n'excédant pas 20 kV, la chute de tension relative $p_{AC3phas}$ provoquée par le transport d'une *puissance électrique active* P_B en W circulant dans un câble triphasé d'une longueur l_L en km peut être facilement déterminée, lorsqu'elle reste faible, par la formule

$$P_{AC3phas} = \frac{\Delta U_{12}}{U_2} = \frac{1}{U_N^2} P_B l_L K_Q \quad (4.1)$$

où K_Q , exprimé en Ω/km , représente la *résistance de référence longitudinale* propre à chaque type de câble. Ce paramètre, qui dépend du niveau de tension du câble, de la matière des conducteurs, de leur section ainsi que du facteur de puissance $\cos \phi$, peut être lu dans un tableau général ou donné par le fabricant (cf. par exemple [6.2]). ΔU_{12} représente la chute de tension sur le câble et U_2 la tension au point de raccordement du câble au réseau interconnecté. Dans le cas précis d'un raccordement à basse tension, on tient compte en général des résistances de référence longitudinales de câbles à 1 kV en cuivre avec une charge dont le $\cos \phi$ plutôt pessimiste vaut 0,8. Si donc on connaît la puissance active produite par un générateur de tension de 400 V, puissance résultant de la multiplication du rendement du générateur en question avec la puissance mécanique délivrée par la turbine (cf. (3.3)), ainsi que la distance qui sépare la centrale du réseau électrique, il ne reste plus qu'à choisir la bonne section du câble à basse tension pour que la chute de tension sur la totalité du raccordement ne dépasse pas 5 % de la tension nominale, soit $P_{AC3phas} < 0,05$.

De plus, chaque câble électrique possède un courant admissible dont le dépassement entraîne un *échauffement* qui peut détériorer l'isolation des conducteurs. En ce qui concerne un câble posé en terre et dont on veut limiter la température des conducteurs en cuivre à 60°C , le constructeur indique une valeur de ce courant (cf. [6.2]), valable pour une charge journalière variable correspondant à 100 % puis 60 % du courant admissible pendant respectivement 10 et 14 heures, valeur qu'il est aisé de modifier dans le cas d'une charge permanente à laquelle serait soumis le raccordement d'une petite centrale : le facteur de correction relatif à la charge permanente, c'est-à-dire à une charge de 100 % du courant admissible pendant 24 heures, vaut 0,85 pour un câble en tuyau enterré (cf. [6.2]). La valeur du courant obtenue tient en outre compte d'une profondeur de pose située entre 0,7 et 1 m, d'une température maximale du sol de 20°C , d'une résistivité thermique maximale du sol de $1^\circ\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ ainsi que d'une température maximale de l'air de 30°C . Ces différents paramètres, que l'on peut également corriger à l'aide de divers facteurs, n'ont le plus souvent pas besoin d'être modifiés.

Un raccordement à basse tension doit donc être dimensionné pour, d'une part, restreindre la chute de tension dans des limites acceptables lorsque la liaison est relativement longue et, d'autre part, respecter le courant admissible du câble indiqué par son fabricant, courant qu'il est nécessaire de contrôler lorsque la distance de connexion est courte même si la chute de tension est faible. En tenant compte d'un câble souterrain d'une section maximale de $3 \times 300 / 300 \text{ mm}^2$ et dont on veut limiter la température des conducteurs à 60°C , on remarque que la puissance maximale d'une petite centrale pouvant être évacuée vaut environ 193 kW (facteur $\cos \phi$ de 0,8). Au-delà de cette valeur, le courant maximal admis pour une charge permanente est dépassé et le câble risque d'être endommagé si la température de ses conducteurs vient à dépasser 70°C ou 90°C , respectivement pour une isolation en PVC ou en matière synthétique réticulée. En outre, cette puissance peut être transportée sur une distance maximale de 330 m si l'on accepte une chute de tension de 5 % de la tension nominale. Notons que l'installation de deux câbles en parallèle permet d'augmenter la puissance maximale transportable. Toutefois, le prix d'une telle liaison risque d'être nettement plus élevé que celui d'un raccordement à moyenne tension.

On constatera aussi que, pour les faibles puissances, il est possible de parcourir de grandes distances, tout en limitant la chute de tension à des valeurs acceptables. Par exemple, un câble d'une section de $3 \times 150 / 150 \text{ mm}^2$ permet de transporter une puissance triphasée maximale de 20 kW sur une distance d'environ 2 km. Un tel câble pourrait d'ailleurs éventuellement servir aussi à entraîner le groupe hydraulique équipant une prise d'eau et son dessableur. Si l'on veut alimenter l'appareil de mesure du niveau d'eau dans une chambre de mise en charge (de quelques dizaines de watts sous une tension monophasée), une section encore plus réduite suffirait.

Finalement, en ce qui concerne les équipements nécessaires au raccordement à basse tension d'une petite centrale, un coupe-circuit d'introduction doit être monté à l'entrée du bâtiment en plus des disjoncteurs assurant la protection du groupe et des installations électriques internes (cf. [6.4]). Le raccordement à basse tension, bien qu'il puisse être relativement coûteux lorsque les câbles ont des diamètres importants, reste donc une alternative simple à mettre en œuvre.

4.2 Câbles et équipements nécessaires au raccordement à moyenne tension

Lorsque la puissance produite par une petite centrale dépasse 200 kW ou que la distance entre le générateur et le réseau électrique devient trop importante pour qu'un câble à basse tension puisse être utilisé, on a généralement recours au raccordement à *moyenne tension* (12, 16 ou 20 kV en fonction du réseau existant). Plutôt que de juxtaposer des câbles à basse tension de grandes sections, on préfère installer une station de transformation à proximité du groupe de turbinage. L'alternateur et les enroulements secondaires du transformateur sont reliés par le biais de câbles à basse tension pouvant être unipolaires et posséder d'importantes sections si les puissances sont considérables. Un câble à moyenne tension relie ensuite les bornes des enroulements primaires du transformateur au réseau à moyenne tension. Un tel câble possède une section de conducteur minimale de 50 mm^2 , qui permet déjà d'évacuer une puissance active maximale d'environ 3,4 MW (cos phi de 0,8) sous une tension de 16 kV et cela dans les mêmes conditions de pose et d'exploitation que celles énumérées pour le raccordement à basse tension. Toutefois, en l'associant à une distance de 6 km, on remarque que ce câble provoque une perte d'énergie électrique transformée en énergie thermique d'environ 5,5 % de l'énergie injectée, soit 186 kW, même si la chute de tension reste inférieure à 5 % de la tension nominale. En choisissant une section de conducteur de 95 mm^2 par exemple, on parviendrait à réduire cette perte de près de la moitié.

L'équipement nécessaire à un raccordement à moyenne tension, en plus des *câbles* susmentionnés, comporte un *transformateur* dont la puissance exprimée en kVA correspond à la *puissance électrique apparente nominale* qui est obtenue en divisant la puissance électrique active produite par le facteur cos phi. Une telle puissance caractérise également l'alternateur d'une centrale. De même qu'il est nécessaire de disposer un *coupe-circuit* à basse tension entre la centrale et les enroulements secondaires du transformateur, une *cellule de couplage* à moyenne tension, généralement isolée au gaz SF₆, doit être installée entre les enroulements primaires du transformateur et le réseau à moyenne tension. Cet équipement remplit les fonctions d'*interrupteur* et de *fusible* et permet donc d'isoler la ligne et de protéger le transformateur. A l'autre bout du câble à moyenne tension, la connexion peut se faire à l'intérieur d'une

station transformatrice ou dans une chambre de raccordement. Dans chacun de ces cas, un nouvel *interrupteur* doit être juxtaposé à l'installation de couplage existante. Il y a également la possibilité de se raccorder à un câble passant dans les environs de la centrale, mais cela exige la construction d'une chambre avec une installation de couplage capable d'isoler chacun des câbles, désormais au nombre de trois, s'y connectant.

Le raccordement d'une petite centrale au réseau à moyenne tension exige donc la construction d'une station transformatrice complète. Celle-ci peut prendre place à l'intérieur de la centrale si le local prévu pour accueillir la turbine n'est pas encore construit; dans un tel cas, le prix du bâtiment en question doit être revu à la hausse. On peut aussi opter pour une station transformatrice indépendante, éventuellement conçue dans un abri préfabriqué, qui serait implantée à proximité de la centrale. Il est possible que l'installation d'un transformateur pour les besoins de la centrale, dans un endroit non encore alimenté en électricité, puisse être profitable à d'autres personnes (chalets, mayens, etc.). Si tel est le cas, on peut espérer que les coûts ne reviennent pas en totalité à la petite centrale.

4.3 Signal nécessaire à la commande de la turbine

Afin de permettre le fonctionnement automatique de la petite centrale, le régulateur de turbine, chargé de contrôler l'ouverture de l'injecteur ou de l'aubage directeur, est généralement asservi au niveau d'eau de la chambre de mise en charge ou d'un réservoir pouvant être situés en amont ou en aval de l'installation de turbinage. Il arrive aussi qu'il dépende directement d'une consigne imposée par un système de régulation déjà présent sur un réseau d'approvisionnement en eau potable. Nous ne nous intéresserons pas ici aux signaux internes au groupe de production (températures des éléments, vitesse de rotation, tensions électriques, etc.) mais uniquement au signal qui doit être fourni par l'exploitant de la turbine pour commander l'organe déterminant le débit.

Lorsque les eaux proviennent directement de captages et que l'on choisit de turbiner une grande partie des apports de ces sources, la turbine fonctionne de manière à maintenir un *niveau d'eau constant* dans la chambre de mise en charge de la conduite forcée qu'elle exploite. Dans la mesure où le débit d'équipement du groupe de production est largement supérieur aux valeurs maximales de consommation d'eau potable de la collectivité alimentée, seule cette mesure de niveau en amont du turbinage est nécessaire. Si des débits supérieurs au débit d'équipement se présentent, le surplus ne pouvant être exploité sera déversé dans le trop plein de la chambre de mise en charge. La perte de ces eaux, qui se seraient de toute manière déversées dans le trop-plein du réservoir en l'absence de turbinage, ne porte donc pas atteinte à l'approvisionnement en eau potable.

En outre, si, pour des raisons de conception de la turbine, le débit d'équipement choisi est inférieur au débit maximal à certaines périodes de l'année (consommation élevée d'une station touristique durant une brève période, débit exceptionnel des sources, conduite existante sous-dimensionnée, etc.), le *by-pass* installé en parallèle de la turbine peut être utilisé. Celui-ci ne sert alors pas seulement lors de mises hors service de la turbine, mais il peut être ouvert, en plus de la turbine, lorsque le débit maximal pouvant être turbiné est insuffisant. Toutefois, comme le débit additionnel empruntant le *by-pass* provoque des pertes de charge supplémentaires dans la conduite forcée, il est préférable de limiter son fonctionnement autant que possible,

cela non seulement pour éviter de faire descendre de l'eau sans la faire produire de l'énergie dans la turbine, mais aussi pour diminuer les pertes dans la conduite et la baisse consécutive probable du rendement de la turbine. Pour ce faire, le réservoir situé directement en aval de la centrale peut être utilisé comme bassin d'équilibre. Lorsque la consommation journalière moyenne est inférieure ou semblable au débit maximal de la turbine, le by-pass peut alors rester inactif même si le débit diurne s'avère supérieur au débit turbiné. Il faut néanmoins s'assurer que le volume du réservoir soit suffisant et, par conséquent, que les variations du niveau d'eau engendrées par l'inégalité des débits entrant et sortant soient possibles. Si tel est le cas, on garantit le fonctionnement optimal de la turbine malgré les fluctuations de la demande en eau de la population. On doit donc détecter un niveau minimal, judicieusement défini, du réservoir situé en aval de la centrale, niveau au-dessous duquel l'ouverture du by-pass sera commandée.

Fréquemment, les eaux potables doivent être traitées par une *usine de filtration* avant qu'il soit possible de les consommer. L'ultrafiltration, par exemple, est un procédé efficace et relativement répandu dans les réseaux d'eaux actuels. Ce traitement permet de supprimer toute bactérie ou virus présent dans l'eau destinée à l'approvisionnement de la population. Toutefois, il représente un coût non négligeable lors de l'installation comme pendant son fonctionnement, d'où l'importance de dimensionner correctement les éléments qu'il comporte. On constate, du reste, que ces systèmes de filtration sont dimensionnés en fonction de la consommation maximale d'une collectivité mais qu'ils sont capables de varier leur production d'eau potable afin de s'adapter à la demande. Par conséquent, dans un réseau comportant une centrale de filtration, le volume d'eau traitée correspond au volume d'eau consommée, si bien qu'aucun trop-plein ne se déverse en aval de l'usine de filtration. L'installation d'une turbine en aval d'une telle usine permet donc d'exploiter les débits traités destinés à la consommation. Dans un réseau d'eau filtrée, les réservoirs peuvent être précédés de vannes à flotteur et de réducteurs de pression, ceci afin d'éviter leur remplissage au-delà de leur capacité. Dans les réseaux les plus modernes, l'utilisation de capteurs de niveau et de vannes commandées permet de contrôler les volumes d'eau stockés, cela dans le but de réguler le fonctionnement de l'usine de filtration. L'implantation d'une petite centrale en lieu et place de l'une de ces vannes est donc particulièrement aisée. Sa commande provient alors d'une mesure du niveau d'eau du réservoir inférieur, éventuellement disposé immédiatement sous la turbine, au cas où l'on remplace une vanne à flotteur. Si le réseau d'eau est automatisé, comme les câblages de commande existent déjà, il suffit d'adapter les signaux qui seront transmis à la turbine. Notons finalement que le fonctionnement de la turbine, tout comme celui de l'usine de filtration, peut être amélioré en évitant, par exemple, les démarrages fréquents et les grandes variations de débit. Comme mentionné précédemment, l'utilisation des réservoirs comme bassins d'équilibre s'avère donc recommandée tant du point de vue de la production énergétique que de celui de la filtration d'eau potable. Pour des raisons de sécurité de l'approvisionnement, un by-pass doit être installé en parallèle à la turbine afin de garantir le remplissage du réservoir situé en aval même en cas de panne du groupe ou du réseau électrique. La vanne existante, dont la fonction est dès lors assurée par la turbine, peut éventuellement convenir à cette tâche.

Lorsque l'installation d'une turbine nécessite la pose d'un capteur de niveau dans une chambre située à une distance non négligeable de la centrale, un *câble de commande à fibres optiques* peut assurer la liaison entre l'appareil de mesure et l'automate commandant le groupe. Si la turbine remplace une simple vanne à flotteur, un câble de commande en cuivre suffit puisque le capteur de niveau se trouve dans le réservoir qui suit directement la centrale. Lorsque les distances sont importantes et qu'il n'est pas prévu d'effectuer une fouille pour

changer la conduite par exemple, la pose d'un câble de commande souterrain devient particulièrement coûteuse. Pour y remédier, on optera pour une transmission des signaux de commande par ondes hertziennes ou, si le relief le permet, par liaison wifi.

Finalement, les appareils de mesure ainsi que les éventuels émetteurs doivent bénéficier d'une alimentation électrique. Pour ce faire, comme il a été mentionné précédemment, un *câble à basse tension* peut transporter sur des distances respectables les faibles puissances dont a besoin ce type de matériel, si aucun réseau électrique n'est disponible sur place. Ce câble peut être relié à la centrale de production, cela pour autant que la distance de connexion soit raisonnable et qu'une fouille soit entreprise pour la conduite d'eau. Dans le cas contraire, il est toujours possible de raccorder l'équipement à un autre point de connexion du réseau à basse tension. Si la chambre de mise en charge dans laquelle s'effectue la mesure est véritablement éloignée de tout point de connexion électrique, une alimentation en îlot, comportant un panneau solaire, une batterie et éventuellement un onduleur, parvient à couvrir la consommation électrique de l'équipement nécessaire à la mesure et à la transmission des signaux.

4.4* La page "Raccordement" du programme MiniHydro

Sur la page "Raccordement" du programme MiniHydro, un calcul est effectué afin de renseigner l'utilisateur sur le type de raccordement à installer entre la petite centrale et le réseau électrique. Les conditions d'installation et d'exploitation des câbles à basse tension sont décrites au sommet de la page. Elles permettent de déterminer les caractéristiques des câbles indispensables aux calculs du courant maximal et des chutes de tension. On considère ici uniquement un raccordement par câble souterrain, système nettement recommandé à l'heure actuelle.

L'utilisateur doit indiquer la longueur du raccordement, la valeur de la *tension composée*, c'est-à-dire la tension mesurée entre deux phases, du réseau de distribution environnant auquel pourrait être reliée la centrale (réseau à basse tension d'environ 400 V) ainsi que la valeur relative de la chute de tension maximale admise sur le câble (entre 3 et 5 % au maximum). Quelques lignes au-dessous, le résultat s'affiche et indique le niveau de tension, à savoir BT pour basse tension ou MT pour moyenne tension. Si un raccordement à basse tension convient, la section des conducteurs du câble à installer s'affiche.

S'il s'avère qu'un raccordement à basse tension ne suffit pas à l'aménagement, en raison de la grandeur excessive d'un ou de plusieurs paramètres parmi la puissance, la longueur ou encore la chute de tension maximale, le résultat indique qu'une connexion à moyenne tension est nécessaire mais ne donne que peu de précisions sur la section et le type de câble à poser. Il faut en effet accorder une attention toute particulière au transport de grandes puissances afin d'éviter que de trop importantes pertes d'énergie se produisent. Par conséquent, on admet qu'un câble à moyenne tension dont les conducteurs ont des sections de 50 mm² convient pour autant que les pertes thermiques ne dépassent pas 1 % de la puissance évacuée; en outre, les limites de 3,4 MW pour la puissance et de 20 km pour la longueur ne doivent pas être dépassées. Le programme MiniHydro indique donc qu'un câble d'une section de 3 x (1 x 50 / 16) mm², c'est-à-dire composé de trois conducteurs de 50 mm² possédant chacun un écran concentrique de 16 mm², est envisageable jusqu'à une puissance électrique de 3,4 MW, mais, à cette puissance-là, sa longueur se limite à environ 1 km. Toutefois, cette

longueur s'approche de 20 km pour une puissance de 200 kW. En ce qui concerne les puissances supérieures à 3,4 MW, les longueurs supérieures à 20 km ainsi que les cas intermédiaires dont les pertes thermiques (calculées de manière pessimiste en fonction de la résistivité du cuivre à une température de 70°C) dépassent 1 % de la puissance transportée, le programme indique seulement que la section doit être supérieure à 50 mm², ce qui est à vérifier et à préciser de façon détaillée pour chaque cas. L'utilisateur désirant plus de détails concernant les câbles à moyenne tension peut consulter les ouvrages cités en bibliographie.

Lorsque que l'utilisateur connaît le type de câble dont il a besoin, il peut consulter le tableau présenté quelques lignes au-dessus du résultat du calcul afin d'évaluer le coût du raccordement. Le montant en question peut être ensuite reporté sur la page "Invest." du programme MiniHydro où quelques lignes sont réservées aux prix des différents câbles électriques. Pour le câble de commande, un prix de 12 CHF/m convient en général. Au stade de l'étude préliminaire, les calculs effectués dans le cadre du raccordement électrique servent essentiellement à évaluer l'investissement que représente l'installation d'un câble. Les informations sur la taille et le type du câble nous renseignent non seulement sur son prix mais également sur les travaux qu'il engendre, en particulier si une fouille doit être excavée car les éventuels tubes existants ne disposent pas de suffisamment de place, ou encore si le bâtiment de la centrale doit être conçu pour accueillir une station transformatrice en plus du groupe de turbinage.

5 Investissements

Dans ce chapitre, nous donnerons la liste des principaux investissements nécessaires à la réalisation d'un petit aménagement hydro-électrique. Ce faisant, nous chercherons avant tout à mentionner les principaux ouvrages et composants qu'il faut construire ou acheter, puis financer. Nous tenterons aussi d'en donner les coûts approximatifs. Bien entendu, ces coûts restent assez imprécis et varient fortement, en particulier selon la puissance et la taille de l'installation, la nature ou la pente du terrain sur lequel sont placées conduite ou centrale, selon la conjoncture économique ou selon les entreprises. Mais il est absolument nécessaire d'avoir des chiffres si l'on veut pouvoir estimer les chances de rentabilité d'un projet avant de passer aux études détaillées et de se lancer dans sa réalisation.

5.1 Bâtiments, prise d'eau, réservoir

Selon le type d'eau turbinée, les ouvrages de captage et de mise en charge de l'eau peuvent être déjà existants ou au contraire à créer entièrement, ce qui a une forte influence sur les coûts: il se peut qu'on puisse réutiliser entièrement les équipements existants, qu'il suffise de les modifier légèrement ou alors qu'il faille tout construire à neuf. Au départ de la conduite forcée, il y a une *prise d'eau* en rivière ou un *captage* de sources qui sont suivis, si nécessaire, par un *dessableur* qui peut être plus ou moins grand selon le débit à traiter et la taille des particules de limon, de sable ou de gravier contenus dans l'eau. Ensuite, il est nécessaire de prévoir un petit *bassin de mise en charge*, de quelques mètres-cubes de contenance, dont le niveau doit être constamment plus élevé que l'ouverture de la conduite, de façon à ce que l'air ne puisse pas y pénétrer; c'est d'ailleurs souvent la mesure de ce niveau qui servira à déterminer le débit de la turbine. Si l'eau sert à d'autres usages que le turbinage, il se peut qu'un tel bassin existe déjà, sous la forme d'une chambre de réunion, d'un réservoir d'eau potable ou de bassin de collecte d'eaux usées. Si l'on peut se contenter de modifier une construction existante, les coûts se monteront à 10'000 ou 20'000 CHF, mais ils seront de plusieurs centaines de milliers de francs s'il faut construire une prise d'eau et un dessableur qui doivent résister aux crues et aux alluvions qu'elles charrient.

Pour le *bâtiment* abritant le groupe électromécanique, il suffit pour les petites machines d'une petite construction de la taille d'un garage. Pour placer les machines à l'intérieur, il faut prévoir un palan ou, ce qui est plus simple, une partie de toit que l'on peut soulever à l'aide d'une grue extérieure, par exemple celle du camion qui apporte les équipements. Là aussi, le prix sera très bas, 20'000 ou 30'000 CHF dans le meilleurs des cas, s'il suffit d'accoler une annexe à un réservoir existant; mais il s'élèvera à plusieurs centaines de milliers de francs s'il faut construire un bâtiment dans un terrain difficile, éventuellement en aménageant une route d'accès. Après la turbine, il faut prévoir l'*ouvrage de restitution*, lequel peut consister en un canal très court si la turbine est placée au-dessus d'un réservoir existant, ou nécessiter un canal de fuite jusqu'à un cours d'eau voisin.

En outre, l'*installation de chantier*, c'est-à-dire l'amenée de l'outillage et la mise en place des locaux et installations nécessaires à l'exécution des travaux, se monte à 10'000 ou 20'000 CHF pour les petits chantiers.

5.2 Conduite forcée

La conduite forcée représente souvent l'investissement le plus coûteux d'un aménagement et il est donc important d'estimer ses coûts avec le plus de précision possible. Elle comprend d'abord les *tuyaux*, pour lesquels on peut reprendre les prix trouvés dans les catalogues (cf. par exemple [4.1] à [4.5]), lesquels représentent souvent un maximum, étant donné que des rabais quelquefois importants sont accordés aux clients qui achètent de grandes quantités. Au prix des tuyaux eux-mêmes, il ne faut pas oublier d'ajouter celui des accessoires tels que les raccords ou les verrouillages lorsque ceux-ci sont nécessaires.

La *fouille*, la *pose* des tuyaux et ensuite le *remblayage* et la remise en état du terrain ont des prix qui peuvent varier du simple au décuple selon la nature du terrain, sa pente, la facilité d'accès ou l'entreprise: 80 CHF/m suffisent dans le meilleur des cas et 500 ou 800 CHF/m sont nécessaires dans d'autres; le chiffre de 200 CHF représente une moyenne assez souvent applicable pour des conduites de diamètre nominal inférieur à 300 mm lorsque le terrain ne présente pas de difficultés particulières. Si la conduite est posée à l'air libre, des socles assurant sa fixation doivent être prévus, en particulier là où elle fait un coude.

Si une conduite sert à d'autres usages qu'à la production d'énergie, comme à l'alimentation en eau potable ou au transport des eaux usées, et qu'elle doit de toute façon être remplacée, on tiendra compte du fait que seuls les *coûts supplémentaires* liés à l'installation d'une turbine au bas de la conduite doivent être mis à charge de la mini-centrale. Cela concerne en particulier le fait que la conduite doit pouvoir supporter la pression et que sa section doit être assez grande pour ne pas occasionner trop de pertes d'énergie. On peut alors considérer que le prix de la fouille doit être payé même sans turbinage et le laisser de côté dans le calcul des investissements. En outre, un autre tuyau, de plus faible section et d'une pression nominale plus basse, cela parce que des coupe-pressions seraient installés ou que l'écoulement serait libre, suffirait à acheminer l'eau en question, si bien que le prix de ce tuyau peut être soustrait à celui du tuyau prévu pour le turbinage.

5.3 Equipement électromécanique

En général, tout l'*équipement électromécanique*, à savoir la vanne de garde, la turbine, la génératrice ainsi que le contrôle-commande, les organes de sécurité et les armoires, est fourni par la même entreprise. Cela a pour avantage la compatibilité des divers composants, le fait qu'il n'y ait qu'un seul partenaire pour la construction, la livraison, le montage, et, plus tard, lorsque l'installation a été mise en service, l'entretien et les cas où la garantie peut être sollicitée. Sur la base d'une série de factures et d'offres pour ces équipements, nous avons établi la formule suivante donnant leur prix (en septembre 2009) en fonction de la puissance hydraulique maximale

$$\text{Prix} = -20'000 + 350 \cdot (P_h - 5) + 2'000 \cdot \sqrt[2]{P_h - 5} + 55'000 \cdot \sqrt[3]{P_h - 5} \quad [\text{CHF}] \quad (5.1)$$

Si le prix calculé de cette manière est plus bas que 20'000 CHF, alors c'est ce montant qui est pris en compte, ce qui est le cas jusque vers 10 kW environ. A ce sujet, il faut savoir que, pour des offres concernant une même machine au même moment, ce prix peut varier du simple au

double selon le fournisseur. En outre, ce prix dépend de la situation économique et de la situation du marché: lorsque les mini-turbines sont très demandées, ou que les cours de l'acier ou du cuivre sont hauts, les prix augmentent, ce qui fait qu'il est difficile d'être précis.

Lorsque la puissance fournie par le groupe est élevée ou que la distance jusqu'au prochain transformateur est grande, il est nécessaire d'élever la tension à 16 kV ou 20 kV non loin de l'alternateur, cela à l'aide d'un transformateur dont le prix est à prendre en compte (cf. à ce sujet la liste de prix standardisés [6.1]). Ce transformateur peut éventuellement être placé dans le même local que la turbine, si celui-ci a été prévu assez grand, ou aussi à proximité, dans une construction préfabriquée conçue spécialement pour ce type d'équipement.

5.4 Raccordement électrique et câblage de commande

En règle générale, si ces raccordements n'existent pas encore, il y a lieu de créer les trois liaisons suivantes. Premièrement, il faut relier la *génératrice au réseau électrique* dans lequel le courant produit est injecté, cela soit à basse tension, c'est-à-dire à 400 V, soit à moyenne tension, c'est-à-dire à 16 kV ou 20 kV; cela nécessite un câble de section assez forte ainsi qu'une *fouille* pour l'y poser. Si l'on choisit de relier l'alternateur au réseau à basse tension, il faut encore s'assurer que la tension générée à ses barres vaille bien 400 V.

Deuxièmement, il faut *alimenter en électricité* l'appareil de mesure du niveau d'eau dont dépend l'ouverture de la turbine, ce qui nécessite un deuxième câble, à basse tension et de faible section. Si l'alimentation se fait à partir de la mini-centrale, ce câble peut être posé dans la même fouille que la conduite forcée; autrement, il faut relier la chambre de mise en charge au réseau à basse tension le plus proche. Si l'on utilise une conduite forcée existante et qu'il n'y a pas besoin d'ouvrir une fouille, on peut aussi alimenter cet appareil à l'aide d'une batterie rechargée par un capteur solaire.

Troisièmement, il faut relier le *régulateur de la turbine à l'appareil* qui mesure le niveau d'eau à maintenir constant ou à tout autre capteur d'information dont dépend le débit à turbiner. Pour cela, il faut en principe un câble à fibres optiques, lequel peut aussi être placé dans la même fouille que la conduite forcée lorsque le niveau surveillé est le niveau amont. Il peut être intéressant aussi d'amener les informations concernant le groupe électromécanique à une centrale de commande, ce qui nécessite une autre fibre optique; les exploitants de grandes centrales, tout comme les communes les plus importantes, ont souvent des réseaux de télésurveillance de leurs installations et désirent y raccorder la nouvelle mini-centrale, sans toutefois que cela soit indispensable à l'exploitation.

Chacun de ces câbles doit être placé dans un *tube à câble* en plastique d'un diamètre nominal de 120 mm. La fibre optique peut être tirée dans le même tube que le câble à basse tension qui lui est parallèle.

5.5 Divers

En plus des équipements précédents, il se peut qu'il en faille encore d'autres, comme en particulier le *by-pass* qu'il faut monter en parallèle à la turbine lorsque l'alimentation en eau ne doit pas être interrompue, même au cas où la turbine serait arrêtée; à titre indicatif, on peut prendre un prix moyen de 25'000 CHF pour cet organe.

Aux coûts des équipements, il convient d'ajouter un supplément se montant normalement à 10 % pour les *frais d'étude et de direction des travaux*. Finalement, il faut prendre en compte 7,6 % de taxe à la valeur ajoutée (TVA) ainsi que, selon l'incertitude de ses estimations, une réserve pour les imprévus, de 10 % par exemple.

5.6* La page "Invest." du programme MiniHydro

Sur cette page, les coûts des composants que nous venons de mentionner peuvent être introduits. Entre parenthèses sont indiquées des valeurs moyennes qui peuvent éventuellement être reprises, cela pour autant que l'utilisateur juge qu'elles sont valables dans le cas traité. Pour les conduites, il faut indiquer le prix par mètre-courant ainsi que la longueur du tronçon concerné; le cas échéant, lorsqu'il s'agit de déduire le prix d'une conduite qui ne serait pas à charge de la petite centrale et qu'on aimerait le faire apparaître, on peut introduire des coûts négatifs.

Le prix de l'équipement électromécanique complet est calculé automatiquement en fonction de la puissance hydraulique maximale à l'aide de la formule (5.1). Il en est de même pour les frais d'étude et de direction des travaux, à raison de 10 % des investissements.

Au bas de la page s'affiche l'investissement total nécessaire à la réalisation de la petite centrale.

6 Rentabilité

6.1 Frais annuels, prix de revient du courant

Une fois les investissements réalisés et la petite centrale construite, il faut l'entretenir, amortir le capital emprunté et payer les intérêts, les taxes et les assurances. Pour les *frais d'entretien*, nous nous référons au guide [0.2] qui donne ces frais en pourcentage des investissements correspondants (fig. 6.1).

Types de coûts	Taux des frais annuel	Référence pour le calcul des frais
1. Turbine et partie électrique	3 à 6 %	Investissement pour les composants concernés
2. Barrage, prise d'eau et conduite forcée	1,2 à 1,6 %	Investissement pour les ouvrages concernés
3. Bâtiment de la centrale et installations annexes	0,4 à 0,6 %	Investissement pour les ouvrages concernés
4. Taxes, impôts, assurances administration	0,8 à 1,5 %	Investissement total

Fig. 6.1 Valeurs estimatives des frais annuels pour l'exploitation et l'entretien des petites centrales (selon [0.2], tableau C.5)

Les coûts annuels les plus importants sont dus à l'*amortissement* de la dette contractée pour financer les investissements et aux *intérêts* de cet emprunt. Si, comme cela se pratique d'habitude, les annuités doivent rester constantes, c'est-à-dire si l'on veut payer chaque année le même montant pour, d'une part, rembourser la dette et, d'autre part, régler les intérêts sur le capital non encore remboursé, le facteur par lequel il faut multiplier la somme empruntée, qui est appelé *facteur d'annuité* a , se calcule selon

$$a = \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \quad (6.1)$$

où r représente le taux d'intérêt, duquel on peut éventuellement soustraire le taux d'inflation, et m désigne le nombre d'années sur lesquelles a lieu l'amortissement. Comme l'Ordonnance sur l'énergie prévoit une durée de versement de la rétribution à prix coûtant de 25 ans (cf. l'appendice 1.1 à l'Ordonnance sur l'approvisionnement en électricité [9.5]), il est indiqué de supposer cette durée de l'emprunt; en outre, comme le montre la figure 6.2, cela correspond aussi à la durée de vie moyenne que l'on peut espérer pour une petite centrale hydraulique.

Groupe de coûts	Pourcentage de l'investissement total	Durée de l'amortissement en années
Ouvrages de génie civil (barrage, prise d'eau, dessableur, canaux, bâtiments, etc.) Constructions métalliques (vannes, grilles, dégrilleur, etc.) Conduite forcée	25-55%	25-30
Composants électromécaniques (turbine, générateur, régulation, commandes, etc.)	20-50%	15-20
Coûts annexes (études, direction des travaux, mise en service, procédures d'autorisation, etc.)	10-20%	15-20
Divers et imprévus	10 %	15-20

Fig. 6.2 Répartition des coûts et durée d'amortissement des composants de petites centrales (selon [0.2], tableau C.2)

Finalement, les *taxes, impôts, assurances et frais d'administration* se montent à environ 0,8 à 1,5 % des investissements (cf. fig. 6.1).

6.2 Rétribution du courant injecté

Le courant électrique produit et injecté dans le réseau public de distribution peut être vendu à divers prix, selon l'accord conclu entre le propriétaire de la petite centrale et le gestionnaire de réseau de distribution qui le rachète. Il est donc possible de vendre son courant au *prix du marché* de l'électricité, ce qui, pour une petite centrale, risque fort de ne pas suffire à couvrir les coûts. Il est aussi possible de faire certifier sa production comme étant du "*courant vert*", c'est-à-dire comme étant d'origine hydraulique et écologique (cf. [8.1]). Troisièmement, il est possible de profiter des mesures prises par la Confédération pour encourager la construction de centrales fonctionnant à l'aide d'énergies renouvelables. Jusqu'au début de l'année 2009, le courant produit par une petite centrale était en principe payé 15 ct/kWh. Depuis cette date, la Loi sur l'énergie révisée (cf. l'appendice 1.1 à l'Ordonnance sur l'approvisionnement en électricité [9.5]), prévoit une "*rétribution à prix coûtant*" (appelée parfois en abrégé RPC) qui donne une base de calcul officiel; il ne faut toutefois pas oublier que ce tarif est sujet à révision périodique car "les coûts de revient et la rétribution s'appuient sur les installations de référence" et "la technologie la plus efficace" (cf. l'annexe à [9.5] concernant la révision de l'Ordonnance sur l'énergie, Art. 3b), et qu'il faut bien sûr qu'il soit accordé au propriétaire d'une nouvelle centrale.

Selon la base légale, la rétribution à prix coûtant "est payée pour la quantité d'énergie électrique injectée au point de mesure" (cf. l'annexe à [9.5] concernant la révision de l'Ordonnance sur l'énergie, Art. 3b). La rétribution comprend trois parties (cf. l'appendice 1.1 à [9.5]). La première est appelée "*rétribution de base*"; elle dépend de la "puissance équivalente", c'est-à-dire en fait de la puissance annuelle moyenne (cf. le paragraphe 3.1 ci-dessus), et est calculée par tranches: chaque part de puissance est payée à un certain tarif (fig. 6.3), soit les 10 premiers

kW à 26 ct/kWh, les 40 suivants à 20 ct/kWh, etc., ce qui donne une courbe non linéaire un peu étrange si l'on reporte le prix en fonction de la puissance (fig. 6.4).

Classe de puissance (kW)	Rétribution de base (ct./kWh)
≤10 kW	26
≤50 kW	20
≤300 kW	14,5
≤1 MW	11
≤10 MW	7,5

Fig. 6.3 Calcul de la rétribution de base (selon [9.5], appendice 1.1, al. 3.2)

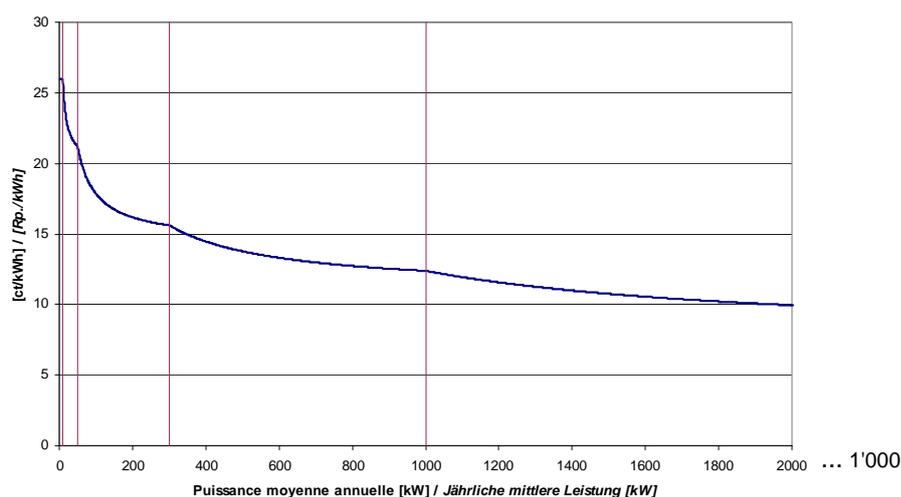


Fig. 6.4 Rétribution de base en fonction de la puissance annuelle moyenne

Deuxièmement, un "*bonus de pression*" est payé en fonction de la hauteur de chute brute; là aussi, le calcul se fait par tranches (figs 6.5 et 6.6). Et troisièmement, un "*bonus d'aménagement des eaux*", c'est-à-dire pour les constructions hydrauliques, est ajouté, cela de nouveau en fonction de la puissance annuelle moyenne (figs 6.7 et 6.8). Cependant, ce bonus n'est pas payé "si la part de l'aménagement des eaux (y compris les conduites sous pression) réalisée selon l'état de la technique fait moins de 20 % de l'ensemble des coûts d'investissement du projet". Il est payé entièrement si cette part dépasse 50 %, et il est payé partiellement, selon une interpolation linéaire entre 0 % et 100 %, si cette part se situe entre 20 % et 50 %.

Classe de hauteur de chute (m)	Bonus (ct./kWh)
≤ 5	4,5
≤ 10	2,7
≤ 20	2
≤ 50	1,5
> 50	1

Fig. 6.5 Calcul du bonus de pression (selon [9.5], appendice 1.1, al. 3.3)

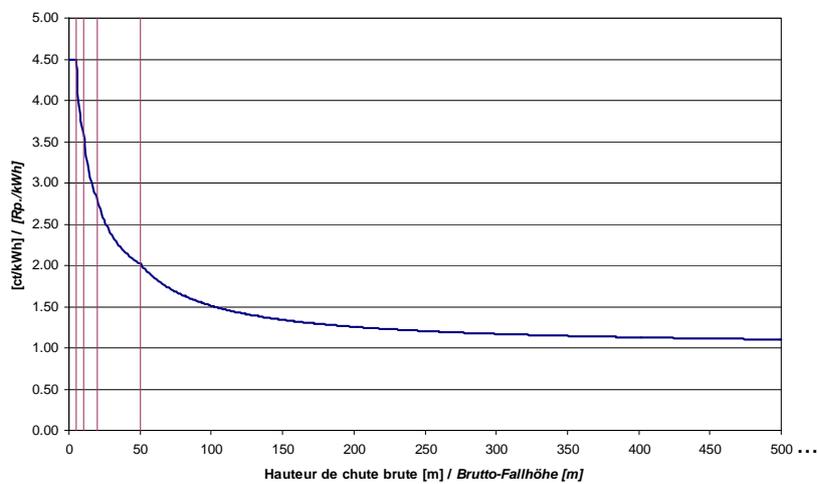


Fig. 6.6 Bonus de pression en fonction de la chute brute

Classe de puissance (kW)	Bonus d'aménagement des eaux (ct./kWh)
≤ 10	5,5
≤ 50	4
≤ 300	3
> 300	2,5

Fig. 6.7 Calcul du bonus d'aménagement des eaux (selon [9.5], appendice 1.1, al. 3.4)

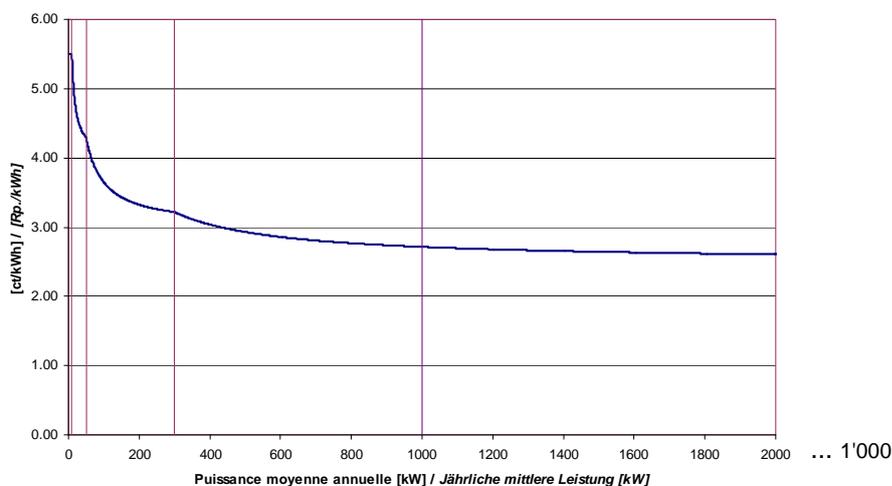


Fig. 6.8 Bonus d'aménagement des eaux en fonction de la puissance annuelle moyenne

Finalement, il faut mentionner que "la rétribution maximale, bonus compris, est de 35 ct/kWh" (cf. [9.5], appendice 1.1, al. 3.6) et que "la rétribution effective est calculée par année civile en fonction de l'électricité mesurée au point d'injection" (cf. [9.5], appendice 1.1, al. 3.5). Pour aider au calcul de la rétribution, un petit programme Excel est mis à disposition sur internet (www.kleinwasserkraft.ch/download/KEV/Berechnung_KEV_Kleinwasserkraft.xls).

6.3 Rentabilité

En additionnant tous les frais annuels (obtenus au paragraphe 6.1 ci-dessus) et en les divisant par la quantité de kWh produits en un an (cf. le paragraphe 3.1), on peut déterminer le *prix de revient* du kWh. Sur la base des frais annuels et du prix de vente des kWh produits (cf. le paragraphe 6.2), il est possible de déterminer finalement le *bénéfice*, ou éventuellement le déficit, annuel causé par l'exploitation de la petite centrale hydraulique.

6.4* La page "Coûts, Rentabil." du programme MiniHydro

Sur cette page, il suffit d'indiquer le taux d'intérêt auquel le capital nécessaire à l'investissement va être emprunté ainsi que la durée de cet emprunt. Les autres données, y compris la rétribution selon l'Ordonnance révisée sur l'énergie, sont calculées automatiquement sur la base des chiffres connus du programme.

Bibliographie sur les petites centrales hydro-électriques, adresses internet *Literatur über Kleinwasserkraftwerke, Internet-Seiten*

Sur les petites centrales hydrauliques / *Über Kleinwasserkraftwerke*

[0.1] -: "Guide pour l'équipement électromécanique des petits aménagements hydro-électriques / *Electromechanical equipment guide for small hydroelectric installations*", Norme CEI / IEC no 61116, Genève 1992

[0.2] Chapallaz J.-M., Eichenberger P.: "Petites centrales hydrauliques: guide pratique pour la réalisation / *Kleinstwasserkraftwerke: Einführung in Bau und Betrieb*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.244 f / d, Berne 1992 / 1993
(www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html)

[0.3] Heer F., Chapallaz J.-M.: "Petites centrales hydrauliques: le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une miniturbine / *Dimensionierung Kleinwasserkraftwerke: Turbinenauswahl, Dimensionierung, Abnahme*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.247.4 f / d, Berne 1995
(www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html)

[0.4] Penche C. et al.: "Guide on how to develop a small hydropower plant", ESHA, Brussels 2004 (www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/publications/Part_1_Guide_on_how_to_develop_a_small_hydropower_plant-Final.pdf)

[0.5] Le Gourières D.: "Les petites centrales hydro-électriques", Moulin Cadiou, Goudelin 2009

1 Sur l'énergie en général / *Über Energie allgemein*

[1.1] Statistiques de l'énergie de l'Office fédéral de l'énergie (www.bfe.admin.ch/themen)

[1.2] Association des entreprises électriques suisses (VSE, ASE), documents et graphiques (www.strom.ch/fr/dossiers.html)

[1.3] Programme SuisseEnergie de l'Office fédéral de l'énergie (www.bfe.admin.ch/energie)

[1.4] Programme "Petites centrales hydrauliques" de l'Office fédéral de l'énergie (www.smallhydro.ch)

2 Sur l'hydraulique en général / *Über Hydraulik allgemein*

- [2.1] Bohl W., Elmendorf W.: "Technische Strömungslehre", 13. Aufl., Vogel, Würzburg 2005
- [2.2] Carlier M.: "Hydraulique générale et appliquée", Eyrolles, Paris 1986
- [2.3] Cauvin A., Guerrée H.: "Eléments d'hydraulique", 10e éd., Eyrolles, Paris 1986
- [2.4] Comolet R.: "Mécanique expérimentale des fluides. Tome 1: statique et dynamique des fluides non visqueux", 5e éd., Dunod, Paris 1990
- [2.5] Comolet R.: "Mécanique expérimentale des fluides. Tome 2: dynamique des fluides réels, turbomachines", 4e éd., Dunod, Paris 1994
- [2.6] Graf W.H., Altinakar M.S.: "Hydrodynamique", 2e éd., in "Traité de génie civil, vol. 14", Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 1998
- [2.7] Grote K.-H., Feldhusen J. (éd.): "Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau" 22. Aufl., Springer, Berlin 2007
- [2.8] Sinniger R.O., Hager W.H.: "Constructions hydrauliques: écoulements stationnaires", in "Traité de génie civil, vol. 15", Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 1989
- [2.9] Streeter V.L. (éd.): "Handbook of fluid dynamics", McGraw-Hill, New York 1961
- [2.10] Streeter V.L., Wylie E.B.: "Fluid mechanics", McGraw-Hill, New York 1975
- [2.11] Vischer D., Huber A.: "Wasserbau", 6. Aufl., Springer, Berlin 2002

3 Sur l'hydrologie et les débits disponibles / *Über Hydrologie und das Wasserdargebot*

Cf. aussi les références [2.8], [2.11]

- [3.1] -: "Atlas hydrologique de la Suisse / *Hydrologischer Atlas der Schweiz*", Office fédéral de l'environnement / *Bundesamt für Umwelt BAFU*, Berne 2001
- [3.2] Musy A., Higy C.: "Hydrologie, une science de la nature", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne 2004
- [3.3] Zaugg C., Leutwiler H.: "Petites centrales hydrauliques et écologie des eaux. Analyse de la situation / *Kleinwasserkraftwerke und Gewässerökologie. Situationsanalyse*", Programme d'action Energie 2000 DIANE / *Aktionsprogramm Energie 2000 DIANE*, Office fédéral de l'énergie / *Bundesamt für Energiewirtschaft*, no 805.631 f / d, Berne 1996 (www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiDiane.html)

[3.4] Zaugg C., Pedroli J.C.: "Poissons et petites centrales hydrauliques / *Fische und Kleinwasserkraftwerke*", Programme d'action Energie 2000 DIANE / *Aktionsprogramm Energie 2000 DIANE*, Office fédéral de l'énergie / *Bundesamt für Energiewirtschaft*, no 805.635 d+f, Berne 1997 (www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiDiane.html)

4 Sur l'hydraulique des conduites / *Über Rohrleitungshydraulik*

Cf. aussi les références du § 2

[4.1] -: "Stalder: Liste des Prix / *Preisliste*", Stalder extrusion SA, Eclépens 2009 (www.stalderextrusion.ch)

[4.2] -: "Georg Fischer Piping Systems, PP/PE, PE Systèmes industriels, catalogue / *PE Industriesysteme, Katalog*", Georg Fischer AG, Schaffhouse 2009 (www.piping.georgfischer.com)

[4.3] -: "vonRoll hydro: Tuyaux et raccords sous pression pour l'adduction d'eau et de gaz / *Druckrohre und Formstücke für die Wasser- und Gasversorgung*", vonRoll hydro AG, Oensingen 2008 (www.vonroll-hydro.ch)

[4.4] -: "Wild Rohre und Armaturen: Tuyaux, pièces spéciales, liste de prix/ *Rohre, Formstücke, Preisliste*", Wild Armaturen AG, Jona-Rapperswil 2009 (www.wildarmaturen.ch)

[4.5] -: "Indufer: Conduites pour l'eau et l'assainissement, prospectus Mannesmann Fuchs / *Leitungsgrohre für Wasser und Abwasser, Prospekt Mannesmann Fuchs*", Indufer AG, Schlieren 2006 (www.indufer.ch)

[4.6] -: "W4f - Directives pour l'étude, la construction, l'exploitation et l'entretien des réseaux d'eau potable à l'extérieur des bâtiments / *W4d - Richtlinien für die Planung, Projektierung sowie Bau, Betrieb und Unterhalt von Trinkwasserversorgungssysteme ausserhalb von Gebäuden*", SSIGE / *SVGW*, Zürich 2004 (www.ssig.ch/francais/pagesnav/PR.htm)

[4.7] Idel'cik I.E.: "Memento des pertes de charge: coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement", 3e éd., Eyrolles, Paris 1986

[4.8] Wagner W.: "Rohrleitungstechnik", 9. Aufl., Vogel, Würzburg 2006

5 Sur les machines hydrauliques / *Über hydraulische Maschinen*

[5.1] -: "Essais de réception sur place des turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines en vue de la détermination de leurs performances hydrauliques / *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*", 3e éd., Norme CEI / *IEC* no 60041, Genève 1991

[5.2] -: "Turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines – Essais de réception sur modèles / *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests*", 2e éd., Norme CEI / *IEC* no 60193, Genève 1999

- [5.3] Bohl W., Elmendorf W.: "Strömungsmaschinen 1, Aufbau und Wirkungsweise", 10. Aufl., Vogel, Würzburg 2008
- [5.4] Bohl W.: "Strömungsmaschinen 2, Berechnung und Konstruktion", 7. Aufl., Vogel, Würzburg 2005
- [5.5] Bovet Th.: "Feuilles de cours illustrées B", 2e éd., Lausanne 1972?
- [5.6] Chapallaz J.-M.: "Petites centrales hydrauliques: turbines hydrauliques / *Dimensionierung Kleinwasserkraftwerke: Wasserturbinen*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.247.1 f / d, Berne 1995 (www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html)
- [5.7] Gülich J.F.: "Kreiselpumpen, Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb", 2. Aufl., Springer, Berlin 2004
- [5.8] Henry P.: "Turbomachines hydrauliques: choix illustré de réalisations marquantes", Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 1992
- [5.9] Raabe J.: "Hydro Power", VDI Verlag, Düsseldorf 1985
- [5.10] Vivier L.: "Turbines hydrauliques et leur régulation", Albin Michel, Paris 1966

6 Sur les alternateurs et les réseaux électriques / *Über Generatoren und elektrische Netze*

- [6.1] -: "Merkur Access 2, Recommandation de la branche pour le marché suisse de l'électricité, Coûts standardisés / *Merkur Access 2, Branchenempfehlung Strommarkt Schweiz, Einheitskosten*", Annexe à la recommandation pour l'évaluation des réseaux de distribution, Association des entreprises électriques suisses (AES), Aarau 2007 (www.electricite.ch/uploads/media/Coûts_standardisés.pdf / www.strom.ch/uploads/media/Einheitskosten.pdf)
- [6.2] -: "Nexans. Câbles et conducteurs d'énergie / *Nexans. Energiekabel und -leitungen*", Nexans Suisse SA, Cortaillod 2009 (www.nexans.ch/eservice/Switzerland-fr_CH/navigate_225/R_seaux_d_nergie.html)
- [6.3] Chatelain J.: "Machines électriques", 2e éd., Traité d'électricité, vol. X, Presses polytechniques romandes, Lausanne 1989
- [6.4] Dos Ghali J., Ludwig J.-P., Chapallaz J.-M., Schopfer E.: "Petites centrales hydrauliques: générateurs et installations électriques / *Dimensionierung Kleinwasserkraftwerke: Generatoren und elektrische Installationen*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.247.2 f / d, Berne 1995 (www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html)
- [6.5] Fischer R.: "Elektrische Maschinen", 14. Aufl., Hanser, München 2009

[6.6] Schwickardi G.: "Elektro-Energietechnik", Bde. 1 - 3, AT Verlag, Aarau 1975 - 1980

[6.7] Wildi T., Sybille G.: "Electrotechnique", 4e éd., De Boeck, Bruxelles 2005

7 Sur l'automatisation / Über Leittechnik

[7.1] Chapallaz J.-M., Heer F.: "Petites centrales hydrauliques: régulation et sécurité d'exploitation / *Dimensionierung Kleinwasserkraftwerke: Regulierung und Sicherheit*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.247.3 f / d, Berne 1995 (www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html)

8 Sur la rentabilité / Über Rentabilität

[8.1] -: "Label naturemade", Verein für Umweltgerechte Energie, Zürich 2009 (www.naturemade.ch)

[8.2] Chenal R.: "Evaluation du coût de construction d'une petite centrale hydro-électrique nouvelle et complète et du prix de revient du kWh (P < 1'000 kW)", MHyLab, Montcherand 2000 (www.mhylab.ch/fr/pages/pdf/cout_PCH.pdf)

[8.3] Chenal R.: "Comment évaluer la faisabilité financière d'une petite centrale hydraulique?", MHyLab, Montcherand 2000 (www.mhylab.ch/fr/pages/pdf/faisabilite_PCH.pdf)

9 Sur la législation / Über die rechtlichen Texte

[9.1] RS 721.80 Loi fédérale du 22 décembre 1916 sur l'utilisation des forces hydrauliques (LFH) / *SR 721.80 Bundesgesetz vom 22. Dezember 1916 über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte (Wasserrechtsgesetz, WRG)* (www.admin.ch/ch/f/rs/c721_80.html)

[9.2] RS 730.0 Loi fédérale sur l'énergie du 26 juin 1998 (LEne) / *SR 730.0 Energiegesetz vom 26. Juni 1998 (EnG)* (www.admin.ch/ch/f/rs/c730_0.html)

[9.3] RS 730.01 Ordonnance fédérale sur l'énergie du 7 décembre 1998 (OEne) / *SR 730.01 Energieverordnung vom 7. Dezember 1998 (EnV)* (www.admin.ch/ch/f/rs/c730_01.html)

[9.4] RS 734.7 Loi du 23 mars 2007 sur l'approvisionnement en électricité (LApEI) / *SR 734.7 Bundesgesetz vom 23. März 2007 über die Stromversorgung (Stromversorgungsgesetz, StromVG)* (www.admin.ch/ch/f/rs/c734_7.html)

[9.5] RS 734.71 Ordonnance du 14 mars 2008 sur l'approvisionnement en électricité (OApEI) / *SR 734.71 Stromversorgungsverordnung vom 14. März 2008 (StromVV)* (www.admin.ch/ch/f/rs/c734_71.html)

- [9.6] RS 814.20 Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux) / *SR 814.20 Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG)* (www.admin.ch/ch/f/rs/c814_20.html)
- [9.7] RS 814.201 Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux) / *SR 814.201 Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV)* (www.admin.ch/ch/f/rs/c814_201.html)
- [9.8] Annonce pour la rétribution à prix coûtant d'une petite centrale hydraulique / *Anmeldung für die kostendeckende Energievergütung für Kleinwasserkraftanlage*, swissgrid, Laufenburg 2008 (www.swissgrid.ch/power_market/renewable_energies/registration_crf/)
- [9.9] RS 721.8 Canton du Valais: Loi sur l'utilisation des forces hydrauliques du 28 mars 1990 (LFH-VS) / *Kanton Wallis: Gesetz über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte vom 28. März 1990 (WRG-VS)*, (www.vs.ch/Navig/navig.asp?MenuID=4628&RefMenuID=0&RefServiceID=0)
- [9.10] RS 721.800 Canton du Valais: Règlement concernant l'exécution de la loi sur l'utilisation des forces hydrauliques du 4 juillet 1990 / *Kanton Wallis: Reglement betreffend die Ausführung des Gesetzes über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte vom 4. Juli 1990*, (www.vs.ch/Navig/navig.asp?MenuID=4628&RefMenuID=0&RefServiceID=0)