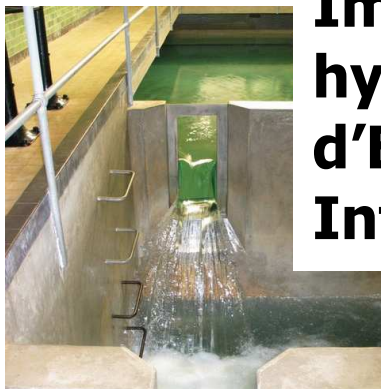
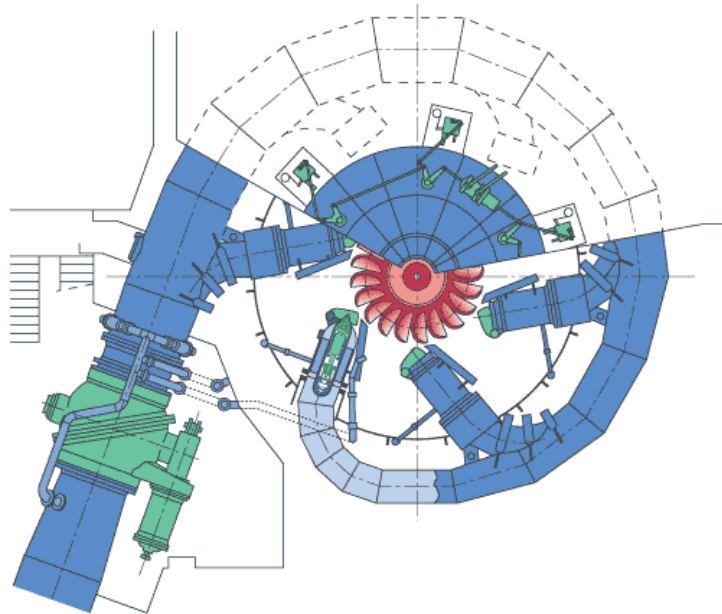


# Mini-hydraulique



## Implantation de mini-centrales hydroélectriques sur le Réseau d'Eau Potable du Service Intercommunal de Gestion

Date : 15 décembre 2006  
Filière: Génie électrique  
Orientation : Électronique systèmes  
énergétiques

Diplômant : Cédric Diserens  
Professeur : Jean-François Affolter  
Expert : Raymond Chenal

## RÉSUMÉ

Le but de cette étude est de déterminer le potentiel existant pour l'implantation de mini-centrales hydroélectriques sur le réseau d'eau potable du service intercommunal de Gestion (SIGE).

Le diplôme s'est déroulé en trois phases distinctes :

La première phase du diplôme est la connaissance des dernières évolutions en terme de mini-hydraulique et plus particulièrement pour les applications sur réseaux d'eau potable.

La deuxième phase est une évaluation de tous les sites potentiels avec l'analyse des débits, la configuration des sites, l'emplacement géographique ainsi que les besoins énergétiques des ouvrages du Service Intercommunal de Gestion (SIGE).

Les sites trop éloignés d'une agglomération ou d'un réseau électrique ne nécessitant aucun besoin électrique pour une consommation propre ont été écartés sous réserve d'une évolution démographique à proximité.

Sur les sites analysés, quatre présentent une puissance installée supérieure à 100 kW, neufs de 3 à 19 kW. Les quatre sites ayant la puissance la plus importante ont été retenus pour une étude de pré-dimensionnement ainsi qu'un calcul économique.

Le remplacement de chambres brise - énergie comme Sollard, Bignièrès et Fontanivent <sup>1</sup> ainsi que la valorisation du trop-plein de la source du Bouveret <sup>2</sup>, donne une possibilité de produire annuellement, sans tenir compte de l'analyse économique, de 1 à 4 GWh d'électricité selon les réalisations choisies. Ce qui représente la consommation annuelle de respectivement 300 à 1200 ménages suisses <sup>3</sup>.

D'un point de vue environnemental cette énergie hydraulique représente une réduction annuelle de 480 à 1800 tonnes<sup>4</sup> d'émission de CO<sub>2</sub>.

La troisième phase et un pré-dimensionnement économique des quatre sites potentiels ayant la plus puissance la plus importante.

Les prix de revient varient de 8 à 18 cts/kWh si l'on compte le remplacement de la conduite dans l'investissement. Mais le remplacement de la conduite peut être considéré comme un maintien de la valeur du réseau étant donné que ces conduites sont en place depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle pour la plus vieille et du milieu des années 60 pour la plus récente et seront de toute façon nécessaires au fonctionnement du réseau et remplacées dans un avenir proche.

En ne tenant pas compte de l'investissement pour la conduite le prix de revient estimé est inférieur à 15 cts/kWh pour toutes les réalisations.

---

<sup>1</sup> Ces trois ouvrages sont situés sur la commune de Montreux.

<sup>2</sup> Commune de Port-Valais.

<sup>3</sup> 1 GWh / an = 300 ménages [17]

<sup>4</sup> 1 GWh produit en mini-hydraulique réduit de 480 tonnes les émissions de CO<sub>2</sub> [17]

<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
<b>2 INTRODUCTION AUX MINI-CENTRALES HYDRAULIQUES</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Définitions</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2 Débit nominal d'équipement</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3 Aménagements intégrés dans un réseau d'eau potable</b> .....	<b>8</b>
2.3.1 Les différentes dispositions possibles.....	8
2.3.2 Exigences légales .....	9
2.3.3 Exigences techniques.....	9
2.3.4 Sécurité d'alimentation.....	9
2.3.5 Labels de qualité .....	9
2.3.6 Les atouts du turbinage de l'eau potable .....	10
<b>2.4 Hydraulique</b> .....	<b>11</b>
2.4.1 La chute brute $H_B$ .....	11
2.4.2 Les pertes de charge $H_L$ .....	11
2.4.3 La chute nette $H_N$ .....	12
2.4.4 Rendement de la conduite.....	12
2.4.5 Longueur de la conduite.....	14
<b>2.5 Électromécanique</b> .....	<b>15</b>
2.5.1 Paramètres communs à toutes les turbines .....	15
2.5.2 Types et configuration de turbines .....	15
2.5.3 Turbine Pelton .....	16
2.5.4 Turbine à flux traversant ou Crossflow .....	18
2.5.5 Turbine Francis .....	18
2.5.6 Kaplan et hélices .....	19
2.5.7 Pompes inversées.....	19
2.5.8 Multiplicateurs.....	20
2.5.9 Domaine de fonctionnement des turbines .....	21
2.5.10 Alternateurs .....	22
<b>2.6 Régulation</b> .....	<b>28</b>
<b>3 RACCORDEMENT AU RESEAU ELECTRIQUE</b> .....	<b>29</b>
<b>3.7 Demande et approbation de projet</b> .....	<b>29</b>
<b>3.8 Normes et Prescriptions</b> .....	<b>29</b>

<b>3.9 Conditions techniques de raccordement .....</b>	<b>29</b>
3.9.1 Facteur de puissance .....	29
3.9.2 Point de sectionnement.....	30
3.9.3 Mise en parallèle avec le réseau.....	30
3.9.4 Surveillance et protection.....	30
<b>4 L'ETUDE DE POTENTIEL.....</b>	<b>31</b>
<b>4.10 Identification des sites potentiels .....</b>	<b>31</b>
<b>4.11 Débits.....</b>	<b>32</b>
<b>4.12 Hauteur de chute .....</b>	<b>32</b>
<b>4.13 Choix des sites pour dimensionnement.....</b>	<b>32</b>
<b>4.14 Demandes d'offres.....</b>	<b>33</b>
<b>4.15 Calcul du prix de revient.....</b>	<b>34</b>
4.15.1 Chambre coupe-pression de Bignières .....	34
4.15.2 Chambre coupe-pression de Sollard.....	39
4.15.3 CCP de Fontanivent .....	40
4.15.4 Trop-plein du Bouveret .....	40
<b>4.16 Modifications administratives .....</b>	<b>40</b>
<b>5 CONCLUSION .....</b>	<b>41</b>
<b>6 REMERCIEMENTS .....</b>	<b>42</b>
<b>7 REFERENCES.....</b>	<b>43</b>
<b>8 LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>44</b>
<b>9 LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>45</b>
<b>10 LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>46</b>

# 1 Introduction

Le service intercommunal de gestion (SIGE) fournit et distribue de l'eau de boisson et l'eau nécessaire à la lutte contre le feu aux communes de Chardonne, Corseaux, Corsier, Jongny, La Tour-de-Peilz, Montreux, Vevey et Veytaux, à des tiers publics ou privés, épure les eaux des communes du district de Vevey, exploite l'abattoir public régional, trie et élimine les déchets animaliers, assume pour le compte des communes des tâches spéciales telles que le nettoyage des rives du lac, la collecte des déchets spéciaux ou encore le contrôle des citernes à mazout.

Le réseau d'eau potable comporte plus de 340 km de conduites qui acheminent l'eau du lac et des sources vers ses clients du district de Vevey. La source principale du SIGE est située aux Avants (alt. 1 040 m) et alimente essentiellement la Ville de Vevey.

Le réseau est composé de deux zones géographiques distinctes :

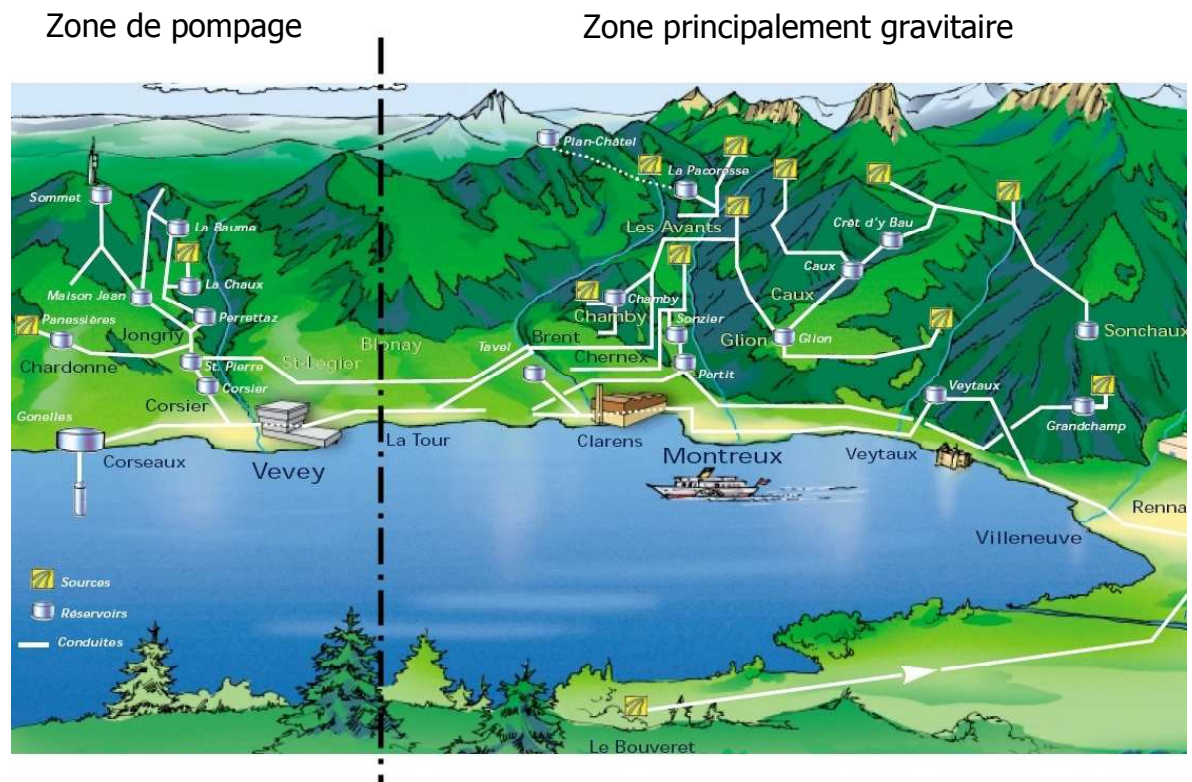


Figure 1 / Réseau d'eau potable du SIGE

La première nécessite une énergie assez importante pour le pompage de l'eau du fait de sa dénivellation de 600m et du peu d'apport d'eau par les sources par rapport à la consommation.

La seconde, où l'approvisionnement se fait principalement de manière gravitaire, ne nécessite que peu de pompage et l'on doit dissiper l'énergie de l'eau dans des chambres dites brise-énergie ou à travers des vannes de réduction de pression afin de limiter celle-ci dans le réseau. Cette énergie qui, dans la configuration actuelle, est inutilisée, pourrait donc être valorisée pour produire de l'électricité en remplaçant ces chambres brise-énergie par des turbines.

La consommation annuelle d'électricité du SIGE est de 9.66 GWh pour 2005 [1]. Le réseau d'eau potable représente à lui seul 2.74 GWh, soit 28% de la consommation totale.

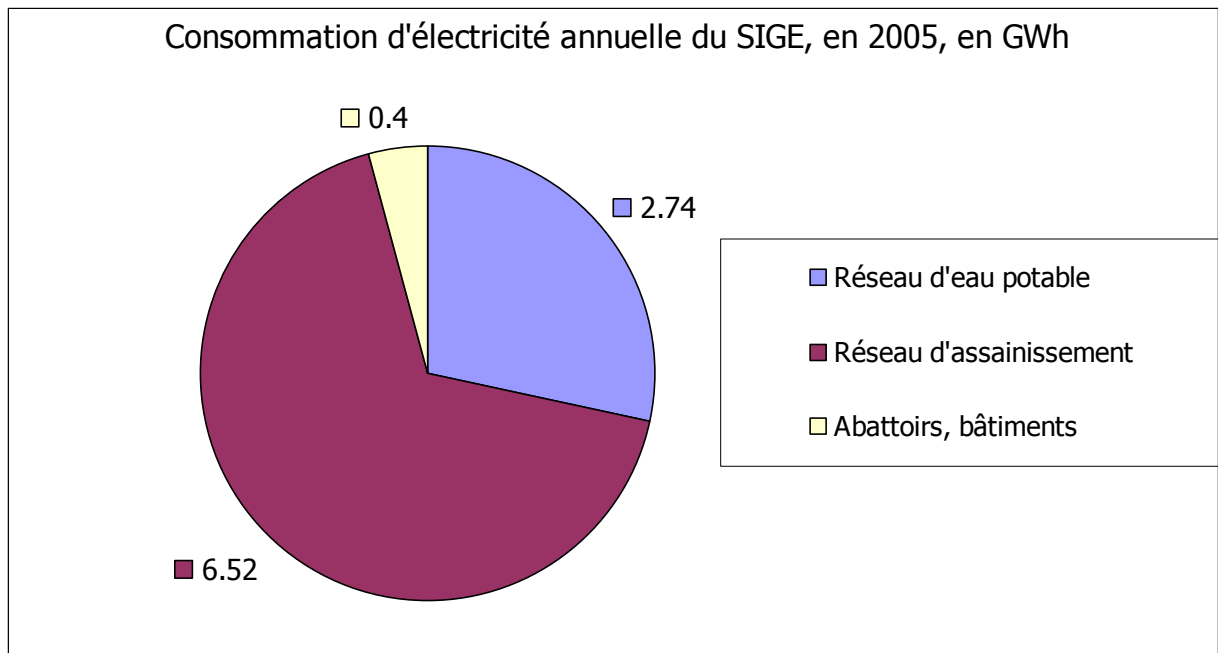


Figure 2 / Consommation d'électricité du SIGE en 2005

La possibilité de compenser tout ou partie de sa consommation d'énergie électrique par de la production hydroélectrique, ainsi que le soutien de la confédération pour promouvoir les énergies renouvelables (réduction des émissions de CO<sub>2</sub>)<sup>5</sup>, ont poussés le SIGE à une étude du potentiel disponible dans son réseau.

Le travail de diplôme a débuté le 04 septembre 06 et s'est terminé le 16 décembre 06. Il s'est déroulé sur le lieu de travail et au domicile de l'étudiant. Des revues de phase avec M. Affolter ont eu lieu toutes les quatre semaines à la heig-vd à Yverdon.

<sup>5</sup> Loi fédérale du 8 octobre 1999 sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (Loi sur le CO<sub>2</sub>).

## 2 Introduction aux mini-centrales hydrauliques

### 2.1 Définitions

Les petites centrales hydrauliques sont définies par une puissance inférieure à 10MW.

Celles-ci peuvent être classées en trois catégories distinctes:

- Centrale à haute chute : 100 m et plus
- Centrale à moyenne chute : 30-100 m
- Centrale à basse chute : 2-30 m

Cette classification permet de définir la catégorie des sites.

Les applications sont :

- Les centrales au fil de l'eau
- Les centrales avec barrage
- Les centrales intégrées dans un canal ou un réseau d'eau potable

### 2.2 Débit nominal d'équipement

Le choix du débit nominal d'équipement se fait selon le domaine de fonctionnement de la centrale et le critère économique. Il est déterminé à l'aide d'une courbe de débits classés.

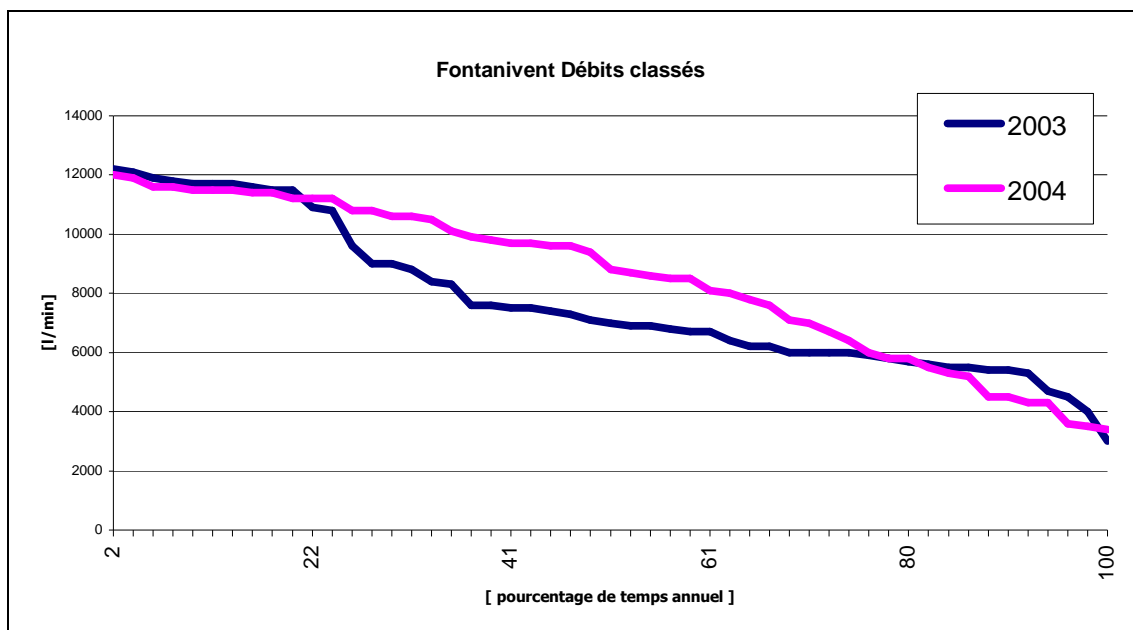


Figure 3 / Courbe de débits classés de Fontanivent

La courbe de débits classés est obtenue en organisant, dans l'ordre décroissant, les débits chronologiques.

Il existe deux domaines de fonctionnement:

- Réseau isolé ou en îlot
- Réseau interconnecté (parallèle au réseau)

En fonctionnement en réseau isolé la centrale doit toujours fournir la puissance nécessaire aux consommateurs [18].

$Q_n \leq Q_{250}$  <sup>6</sup>Fonctionnement en îlot

Une centrale interconnectée au réseau électrique doit produire le plus d'énergie possible. Le débit nominal dépend donc de la forme de la courbe des débits classés. L'optimum énergétique et financier se situe en général autour de 50 à 90 jours de fonctionnement à débit nominal.

$Q_n = Q_{90}$  à  $Q_{50}$  Fonctionnement en parallèle

Pour la suite de l'étude nous prendrons en compte le débit qui correspond environ à  $Q_{60}$ , ce débit a été déterminant pour les demandes d'offres aux fournisseurs. Il n'a pas été possible de demander des offres pour plusieurs débits afin de déterminer celui correspondant à un optimum financier. La charge de travail aurait été trop importante pour les fournisseurs, sans garantie pour eux d'obtenir un marché vu que ce n'est qu'une étude de potentiel.

Le débit  $Q_{min}$  est le débit au-dessous duquel une turbine ne peut plus fonctionner normalement.

## 2.3 Aménagements intégrés dans un réseau d'eau potable

### 2.3.1 Les différentes dispositions possibles

L'eau potable est souvent fournie à une agglomération en transportant l'eau par une conduite en charge depuis un réservoir d'eau amont. Lorsque les différences d'altitude entre la source et un réservoir, ou une usine de traitement, sont importantes, la pression excédentaire est habituellement dissipée dans des vannes de réduction de pression ou des chambres dites brise-énergie <sup>7</sup>. L'installation d'une turbine à l'extrémité de la conduite permet de valoriser cette énergie potentielle en la transformant en électricité. La turbine remplace alors la fonction du brise-énergie [2].

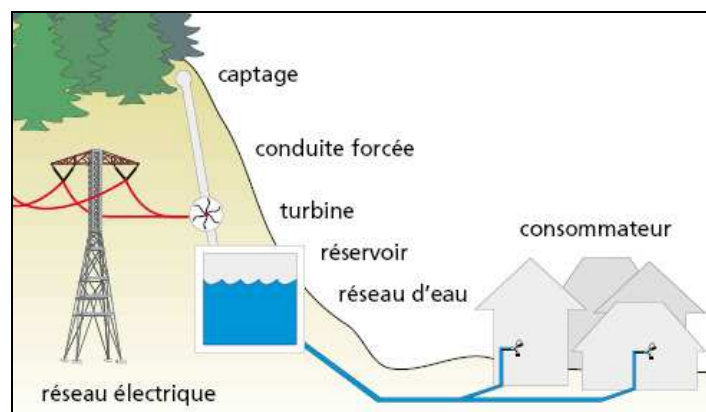


Figure 4 / Turbine disposée à l'entrée d'un réservoir

Les différentes dispositions sont :

- Turbinage sur la conduite entre deux réservoirs
- Turbinage sur la conduite d'amenée de l'eau de source vers un réservoir
- Turbinage entre deux zones de pression
- Turbinage du trop plein d'un réservoir

<sup>6</sup>  $Q_{250}$  : débit atteint pendant 250 jours/an.

<sup>7</sup> Pour la suite du rapport elles seront dénommées CCP ou chambre coupe-pression.

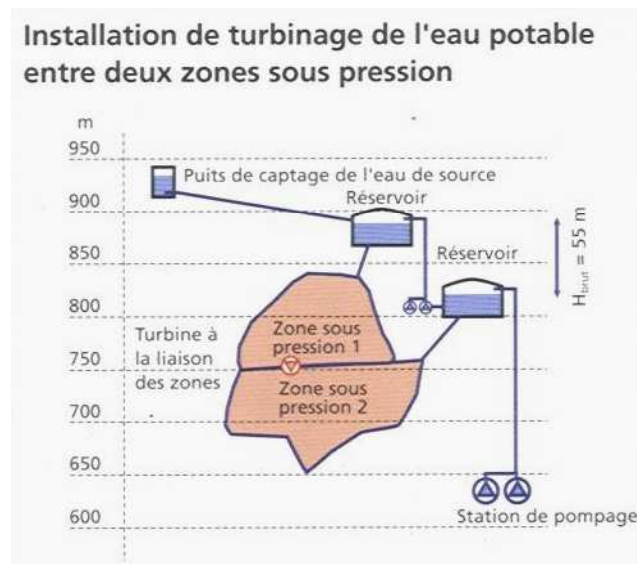


Figure 5 / Turbinage entre deux zones de pression [2]

Les réseaux d'eau, avec les mini et microcentrales, représentent un potentiel intéressant de par leurs infrastructures techniques existantes ne nécessitant que de faibles coûts d'adaptation.

### 2.3.2 Exigences légales

Une installation de turbinage doit respecter aussi bien les exigences liées au réseau d'eau que celles liées à l'utilisation de la force hydraulique. Elles doivent faire l'objet d'une autorisation du laboratoire cantonal ainsi que d'une autorisation de construire de la part de la commune concernée si la construction d'un bâtiment est nécessaire.

Les équipements hydrauliques tels que les conduites, vannes et clapets doivent répondre aux normes et directives de la SSIGE.

### 2.3.3 Exigences techniques

Les conduites, coudes et autres accessoires devront pouvoir supporter d'éventuels phénomènes de coup de bélier. Afin de limiter les variations de pression les manœuvres d'ouverture et fermeture de vannes devront s'effectuer assez lentement.

### 2.3.4 Sécurité d'alimentation

L'alimentation en eau étant la fonction principale du réseau, on doit installer un système de by-pass automatique qui assurera la continuité de celle-ci lors de travaux d'entretien, de débit insuffisant ou autres. Il fonctionne également comme organe de régulation de débit, asservi au niveau de la chambre de mise en charge ou du réservoir amont.

### 2.3.5 Labels de qualité

Les centrales de turbinage de l'eau potable bénéficient de simplifications dans les procédures d'audit pour l'obtention de labels. Les labels permettent de négocier des prix de rachat plus élevés que le tarif des distributeurs d'électricité.

Les certifications peuvent être groupées si les installations se trouvent sur le même tronçon du cours d'eau. Les différentes installations sont auditées et certifiées ensemble avec un seul concessionnaire et numéro de licence. Les frais de licence et certifications ne sont prélevés qu'une fois.

### 2.3.6 Les atouts du turbinage de l'eau potable

- La production d'électricité par la force hydraulique contribue de manière importante à l'objectif que s'est fixé la Suisse qui est d'augmenter la part des énergies renouvelables.
- La construction d'installation de turbinage d'eau potable ne représente pas une atteinte durable à la nature, les installations étant à peine visibles et pouvant s'intégrer dans les infrastructures déjà existantes.
- Les installations ne produisent pas d'émissions nuisant à la santé et leurs besoins en énergie grise sont très faibles. Les installations de turbinage de l'eau potable présentent le meilleur éco-bilan des énergies renouvelables. Pour 1kWh nécessaire à la construction de l'installation, celle-ci fournira en contrepartie 538 kWh. [2]
- Les installations d'eau potable bénéficient d'une synergie des coûts avec d'autres projets, comme le remplacement de conduites pour le maintien de la valeur du réseau. Un tarif de rachat de 15 ct/kWh<sup>8</sup> ainsi que la possibilité de labéliser (Naturemade, Tüv) l'électricité pour être vendue à meilleur prix. Le prix est à négocier avec le distributeur (de 15 à 27 cts/kWh). [2]
- Elles ne nécessitent que de faibles coûts d'exploitation et les tâches d'entretien peuvent être intégrées dans l'exploitation normale du réseau.
- La propreté de l'eau potable permet une durée de vie des turbines plus longue que d'autres centrales hydroélectriques.

---

<sup>8</sup> Recommandation de l'office fédéral de l'énergie et conformément à la loi et à l'ordonnance fédérale sur l'énergie, valable pour les centrales hydrauliques de 1 MW de puissance brute .

## 2.4 Hydraulique

### 2.4.1 La chute brute $H_B$

La chute brute représente l'énergie totale à disposition entre l'entrée et la sortie de l'aménagement :

$$H_B = \Delta Z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + \sum H_L \quad [m] \quad [2.1]$$

Avec :

- $\Delta Z$  : hauteur (énergie potentielle), en [m]
- $p/\rho g$  : hauteur de pression, en [m] ( $p$  est la pression relative, sur- ou sous pression, mesurée par rapport à la pression atmosphérique)
- $v^2/2g$  : hauteur de vitesse (énergie cinétique), en [m]
- $g$  : accélération due à la pesanteur =  $9.81$  [ $m/s^2$ ]
- $\rho$  : masse volumique de l'eau =  $1000$  [ $kg/m^3$ ]
- $H_L$  : pertes de charge, en [m]

### 2.4.2 Les pertes de charge $H_L$

Les pertes de charge sont calculées en fonction de la géométrie des ouvrages et des matériaux utilisés. Elles varient en fonction du débit turbiné.

Elles sont de deux types :

- les pertes locales ou singulières  $H_{L_S}$
- les pertes réparties ou linéaires  $H_{L_f}$

$$H_L = H_{L_S} + H_{L_f} \quad [m] \quad [2.2]$$

Les pertes singulières  $H_{L_S}$  sont dues aux entrées, sorties, grilles, rétrécissements, élargissements, coudes, vannes etc. Elles varient avec le carré de la vitesse et dépendent de la géométrie de la singularité.

$$H_{L_S} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad [2.3]$$

Avec :

- $H_{L_S}$  : pertes singulières, en [m]
- $K$  : coefficient de pertes de charge, sans unité, dépend du type de singularité et de sa géométrie.
- $v$  : vitesse de l'écoulement, en [m/s], à l'amont de la singularité
- $g$  : accélération due à la pesanteur, en [ $m/s^2$ ]

Les pertes linéaires  $H_{L_f}$  sont les pertes par frottement entre l'eau et les parois. Elles ont lieu dans les canaux, conduites d'amenée d'eau et conduites forcées. Elles varient avec le carré de la vitesse et dépendent de la géométrie de la section, de la longueur de la conduite ainsi que du matériau formant les parois. Une des méthodes pour déterminer les pertes de charge linéaire est la formule de Manning - Strickler:

$$H_{L_f} = \frac{L \cdot v^2}{K^2 \cdot R_h^{4/3}} \quad [m] \quad [2.4]$$

Avec :

- $L$  : longueur de conduite considérée, en [m].
- $K$  : coefficient de rugosité selon Strickler, en [ $m^{1/3}/s$ ], dépend du type de matériaux et de l'état de la surface de contact entre l'eau et la paroi.
- $R_h$  : Rayon hydraulique.

$$R_h = \text{surface mouillée} / \text{périmètre mouillé} \quad [\text{m}] \quad [2.5]$$

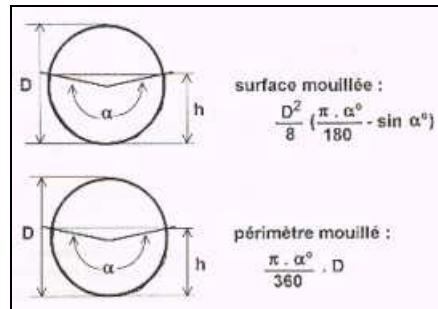


Figure 6 / Périmètre mouillé et surface mouillée

### 2.4.3 La chute nette $H_N$

La chute nette représente l'énergie effective à la disposition de la turbine, mesurée entre l'entrée et la sortie de la machine.

Elle se calcule en déduisant de la chute brute, les pertes de charge à l'amont et à l'aval de la turbine  $H_L$  et l'énergie cinétique résiduelle qui est perdue à la sortie de la turbine.

La chute nette disponible est donc:

$$H_N = H_B - \Sigma H_L - \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad [2.6]$$

La perte de l'énergie cinétique résiduelle est négligée<sup>9</sup> ce qui donne la formule suivante :

$$H_N = H_B - \Sigma H_L \quad [\text{m}] \quad [2.7]$$

### 2.4.4 Rendement de la conduite

Le rendement énergétique de la conduite peut être déterminé comme suit [3]:

$$\eta_c = 1 - \mu \cdot \frac{L}{g \cdot \Delta Z} \quad [-] \quad [2.8]$$

Avec :

$$\mu = 0.8106 \cdot \lambda \cdot D^{-5} \cdot Q^2 \quad [\text{J/kg/m}]$$

$\lambda$  : coefficient de frottement de la conduite

$\Delta Z$  : dénivellation [m]

Pour déterminer le coefficient de frottement  $\lambda$  on utilise la méthode de Colebrook – White à l'aide de la rugosité et le nombre de Reynolds  $R_e$  :

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{D} \quad [2.9]$$

- $\Delta$  : rugosité de la conduite [m]
- $D$  : diamètre de la conduite [m]

<sup>9</sup> L'énergie cinétique résiduelle n'est pas négligée pour les installations basse chute.

Si :

$$0.00008 < \bar{\Delta} < 0.0125 \quad [2.10]$$

Alors la formule suivante sert à déterminer  $\lambda$  :

$$\lambda = 0.1 \cdot \left( 1.46 \cdot \bar{\Delta} + \frac{100}{R_e} \right)^{1/4} \quad [2.11]$$

avec :

$$R_e = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu} \quad [2.12]$$

$\nu$  : viscosité cinématique de l'eau [m<sup>2</sup>/s]

D : diamètre de la conduite [m]

Q : débit [m<sup>3</sup>/s]

Le nombre de Reynolds  $R_e$  détermine dans quel régime hydraulique on se trouve [4].

- $R_e < 2000$  : Laminaire
- $2000 < R_e < 3000$  : Intermédiaire
- $R_e > 3000$  : Turbulent

La viscosité cinématique de l'eau dépend de la température de celle-ci. L'eau de la source des Avants a une température comprise entre 6.8 et 7.9 °C selon un échantillon de 26 mesures effectuées de l'an 2000 à 2006. [20] La viscosité déterminante pour le calcul des pertes de charge est celle qui correspond à la température de 10°C. Elle est égale à  $1.308 \cdot 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s].

L'équation 2.8 démontre que la perte d'énergie dans une conduite est inversement proportionnelle à la puissance cinquième de son diamètre. Le graphique de la figure 7 illustre la variation des pertes de charge en fonction de l'augmentation du diamètre de la conduite pour un débit donné.

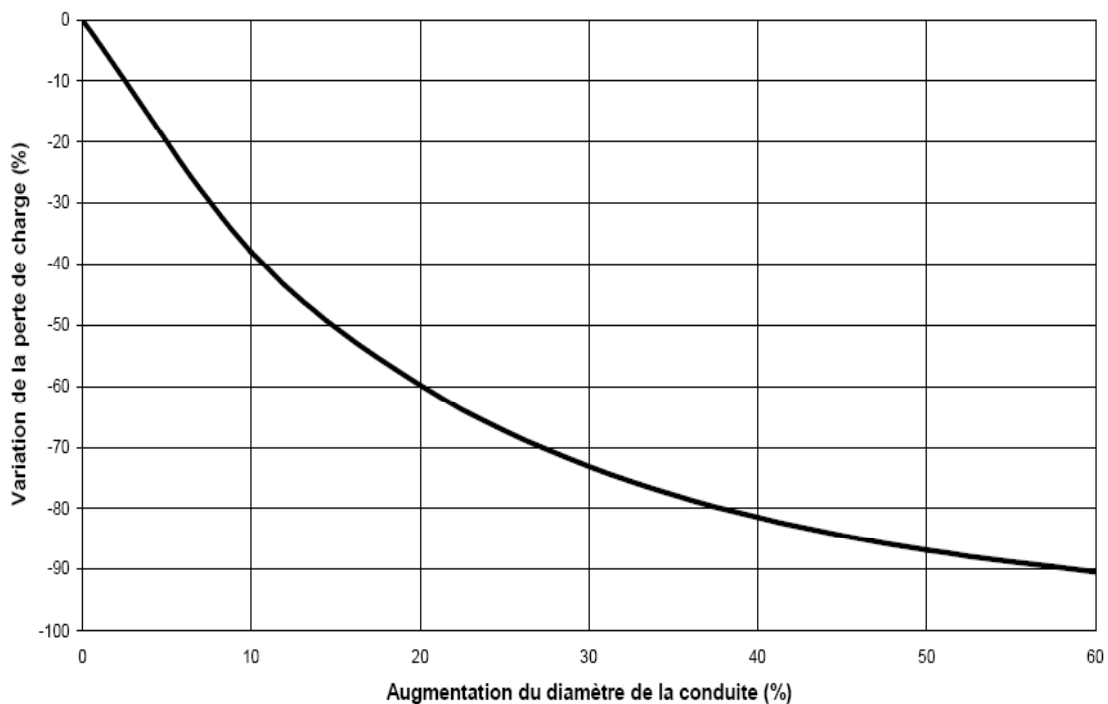


Figure 7 / Variation des pertes de charge en fonction de l'augmentation du diamètre de la conduite [3]

### 2.4.5 Longueur de la conduite

Pour déterminer les pertes de charge et le rendement de la conduite il faut tout d'abord mesurer la longueur de celle-ci [3] :

$$L = 1,25 * [(X1-X2)^2 + (Y1-Y2)^2 + (Z1-Z2)^2]^{0,5} \quad [m] \quad [4.13]$$

Avec :

- X1, X2 = coordonnées horizontales, relevées sur la carte, des points haut et bas de l'aménagement [m]
- Y1, Y2 = coordonnées mesurées verticalement sur la carte [m]
- Z1, Z2 = cotes d'altitude [m]

Le coefficient 1,25 tient compte des aléas du cheminement de la conduite. Cette longueur est de  $\pm 8\%$  par rapport à la longueur réelle de la conduite. Une diminution de 8% de la longueur de la conduite fait augmenter son rendement de 2% environ.

Toutes les cotes et coordonnées ont été mesurées sur les plans du réseau au 1/5'000.

Les conduites étant conçues pour de la distribution d'eau potable, leur longueur est supérieure à la longueur la plus rentable économiquement qui, selon une étude de coût effectuée sur 118 sites [13], est égale à trois fois la hauteur nette.

Si la pente de la conduite forcée est inférieure à celle donnée par cette relation, la longueur de conduite augmente et le coût aussi. Si elle supérieure on se trouve avec des difficultés techniques plus importantes pour la pose de la conduite donc des coûts supérieurs.

## 2.5 Électromécanique

### 2.5.1 Paramètres communs à toutes les turbines

La puissance hydraulique à disposition de la turbine est donnée par [5] :

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_B \cdot \eta_C \quad [W] \quad [2.14]$$

Avec :

- $\rho$  = masse volumique de l'eau [kg/m<sup>3</sup>]
- $Q$  = débit [m<sup>3</sup>/s]
- $gH_B$  = énergie hydraulique massique [J/kg]
- $g$  = accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>]
- $H_B$  = chute brute [m]
- $\eta_C$  = rendement de la conduite [-]

La puissance mécanique fournie par la turbine est donnée par :

$$P_{\text{méc}} = P_h \cdot \eta_T \quad [W] \quad [2.15]$$

Avec :

- $\eta_T$  = rendement de turbine [-]

Ce qui nous donne la puissance électrique :

$$P_{\text{élec}} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_B \cdot \eta_C \cdot \eta_T \cdot \eta_A \quad [W] \quad [2.16]$$

Avec :

- $\eta_A$  = rendement alternateur [-]

La vitesse spécifique est un critère pour le choix d'une turbine. C'est la vitesse en t/min qu'aurait une turbine semblable à la turbine réelle, mais rapportée à une puissance de 1kW, sous une chute de 1m [6].

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{1.36 \cdot P_T}}{H^{5/4}} \quad [t/min] \quad [2.17]$$

Avec :

- $n$  : vitesse de la turbine [t/min]
- $H$  : hauteur de chute [m]
- $P_T$  : Puissance de la turbine [kW]

### 2.5.2 Types et configuration de turbines

Il existe deux types de turbines :

- Les turbines à action
- Les turbines à réaction

Les turbines à action dont la plus répandue est la Pelton. La pression de l'eau est entièrement convertie en énergie cinétique avant d'entrer en contact avec la roue et de lui transmettre son

énergie. L'énergie cinétique est véhiculée par un jet à haute vitesse s'écoulant dans des augets, montés sur la périphérie de la roue.

Les turbines à réaction sont les turbines Francis et Kaplan. L'eau sous pression induit une force sur la face des aubes de la roue. Au fur et à mesure que l'eau traverse la turbine, la pression diminue, transformée en énergie mécanique de rotation et transmise au générateur par l'arbre de transmission. La roue de la turbine est entièrement immergée et son bâti doit être capable de supporter la pression de service.

### 2.5.3 Turbine Pelton

La turbine Pelton est une turbine à action utilisée pour des hautes chutes, de 60 m jusqu'à plus de 1'000 m. Elle est constituée d'une roue à augets sur lesquels un ou plusieurs injecteurs acheminent l'eau. Chaque injecteur est constitué d'une tuyère permettant de former un jet d'eau à haute vitesse, et d'un pointeau mobile permettant de contrôler le débit. Le réglage des pointeaux se fait par un asservissement hydraulique ou électrique. Pour les installations d'eau potable on préférera un asservissement électrique.

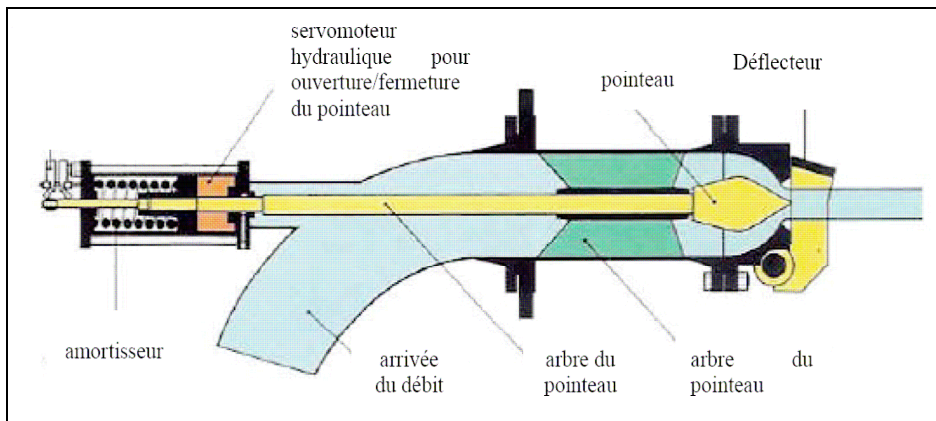


Figure 8 / Coupe d'un injecteur avec déflecteur [7]

Les axes des injecteurs sont situés dans le plan de la roue. En cas d'arrêt d'urgence de la turbine, le jet est dévié par un déflecteur, afin qu'il n'atteigne pas les augets et que la turbine ne puisse pas atteindre sa vitesse d'emballement. Cette action permet de fermer l'injecteur en manœuvrant très lentement le pointeau, évitant ainsi de générer un coup de bélier inacceptable dans la conduite.

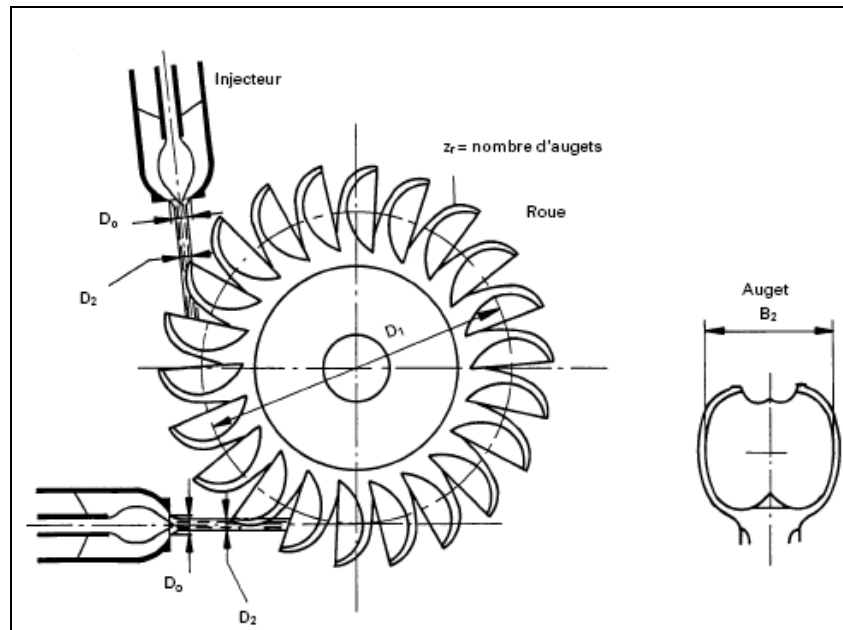


Figure 9 / Pelton à deux jets et paramètres principaux [5]

Avec :

- $D_0$  = diamètre de la buse [m]
- $D_1$  = diamètre sur lequel agit le jet [m]
- $D_2$  = diamètre du jet [m]
- $Z_r$  = nombre d'augets

Le débit par injecteur est donné par :

$$Q_1 = c \cdot \frac{\pi}{4} D_2^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad [2.18]$$

Les paramètres de la roue se déterminent comme suit :

Diamètre du jet

$$D_2 = \left( \frac{4}{\pi \cdot c} \frac{Q_1}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \right)^{1/2} \quad [\text{m}] \quad [2.19]$$

Diamètre sur lequel agit le jet (appelé diamètre de référence) :

On calcule la vitesse périphérique de la roue

$$U_1 = \omega \cdot \frac{D_1}{2} \quad [\text{m/s}] \quad [2.20]$$

$$U_1 = u_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad [\text{m/s}] \quad [2.21]$$

$$u_1 = 0.44 \text{ à } 0.48$$

donc finalement le diamètre de référence vaut

$$D_1 = \frac{2}{\omega} u_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad [\text{m}] \quad [2.22]$$

L'énergie cinétique de l'eau sortant des augets n'étant pas récupérable, et donc transformable en énergie mécanique, les augets doivent être conçus de manière à limiter la vitesse de sortie et ainsi maximiser la transformation d'énergie.

La turbine Pelton peut atteindre des rendements de 90%, voir plus, pour des profils étudiés en laboratoire.

### 2.5.4 Turbine à flux traversant ou Crossflow

La turbine à flux traversant est une turbine à action de construction simple et robuste. Elle est constituée de trois parties :

- Un injecteur de section rectangulaire
- Une roue composée d'aubes profilées
- Un bâti dans lequel se trouve la roue

Un particularité de la turbine à flux traversant est que l'eau traverse deux fois la roue. Elle est utilisée pour les moyennes chutes de 2 à 200m. Son rendement est inférieur aux autres turbines.

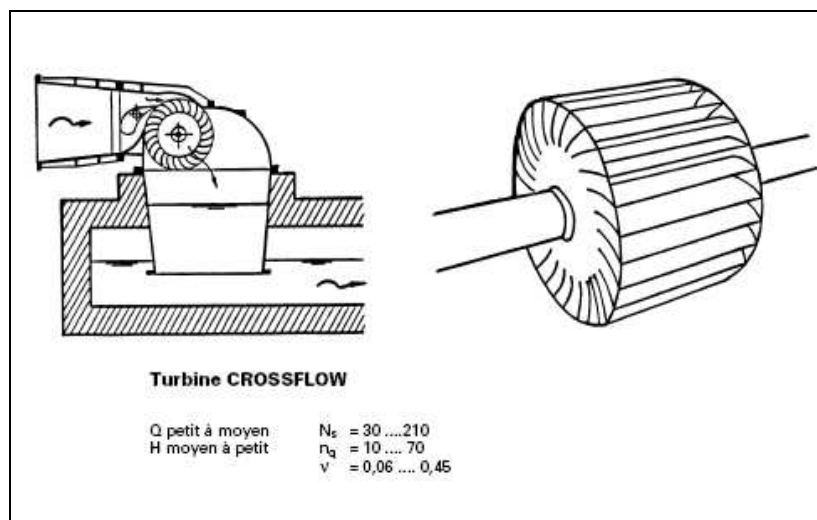


Figure 10 / Turbine Crossflow [5]

### 2.5.5 Turbine Francis

Les turbines Francis sont des turbines à réaction possédant une roue à aubes fixes et un distributeur à aubes mobiles. L'admission de l'eau est radiale et la sortie axiale. Leur champ d'application habituel est de 25 à environ 350 m de chute.

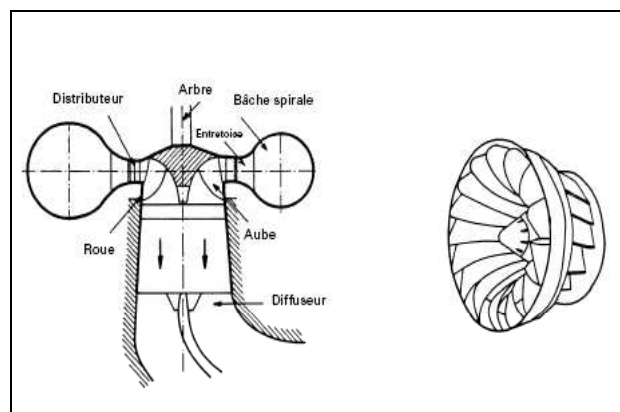


Figure 11 / Turbine Francis [5]

Elles utilisent à la fois la vitesse de l'eau et la différence de pression sur les pales. Les aubages, fonctionnant comme une aile d'avion, utilisent la force portante résultant de la différence de pression entre les deux faces.

### 2.5.6 Kaplan et hélices

Les turbines Kaplan et hélices sont des turbines à réaction axiales, utilisées généralement pour des basses chutes de 2 à 40 m.

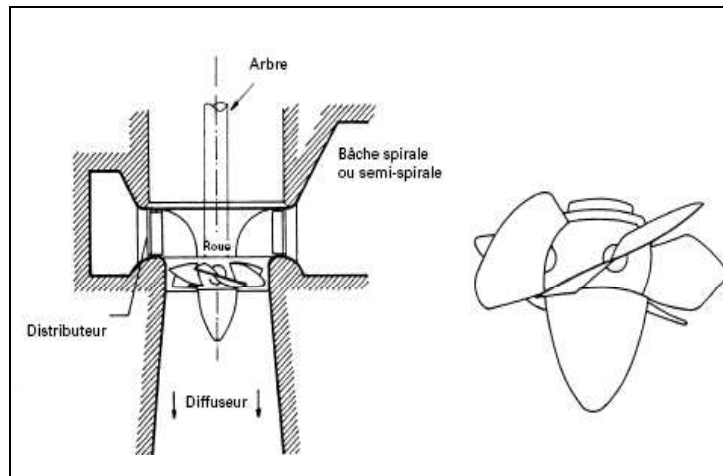


Figure 12 / Turbine Kaplan [5]

Les possibilités de réglage de ces machines sont :

- Turbine hélice à pales et distributeur fixe
- Turbine hélice à pales variable et distributeur fixe
- Turbine Kaplan à pales variables et distributeur fixe
- Turbine Kaplan à pales et distributeur réglables

Le choix du réglage dépend du site.

### 2.5.7 Pompes inversées

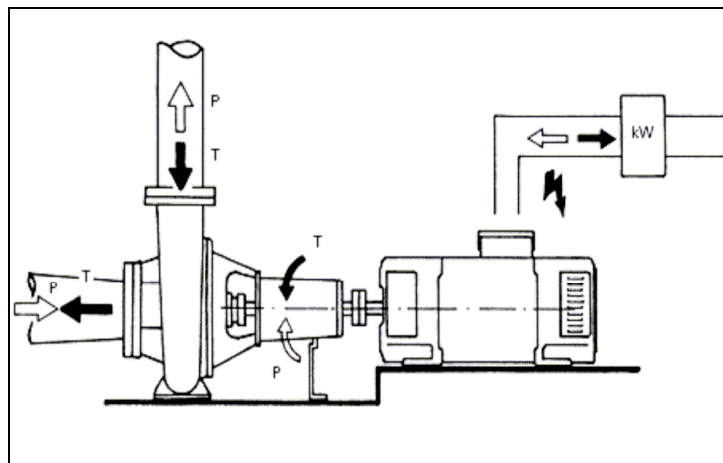


Figure 13 / Pompe inversée [5]

La pompe inversée est une pompe standard utilisée comme turbine en inversant le sens d'écoulement de l'eau. D'un coût de construction moins élevé que les autres turbines, elle comporte cependant des inconvénients :

- Elle ne peut travailler qu'à débit constant : une variation du débit entraîne immédiatement une diminution du rendement.
- En cas de panne réseau elle peut provoquer d'importants coups de bélier dans les conduites

- La construction doit être modifiée pour pouvoir fonctionner en turbine
- Le rendement est inférieur aux autres turbines

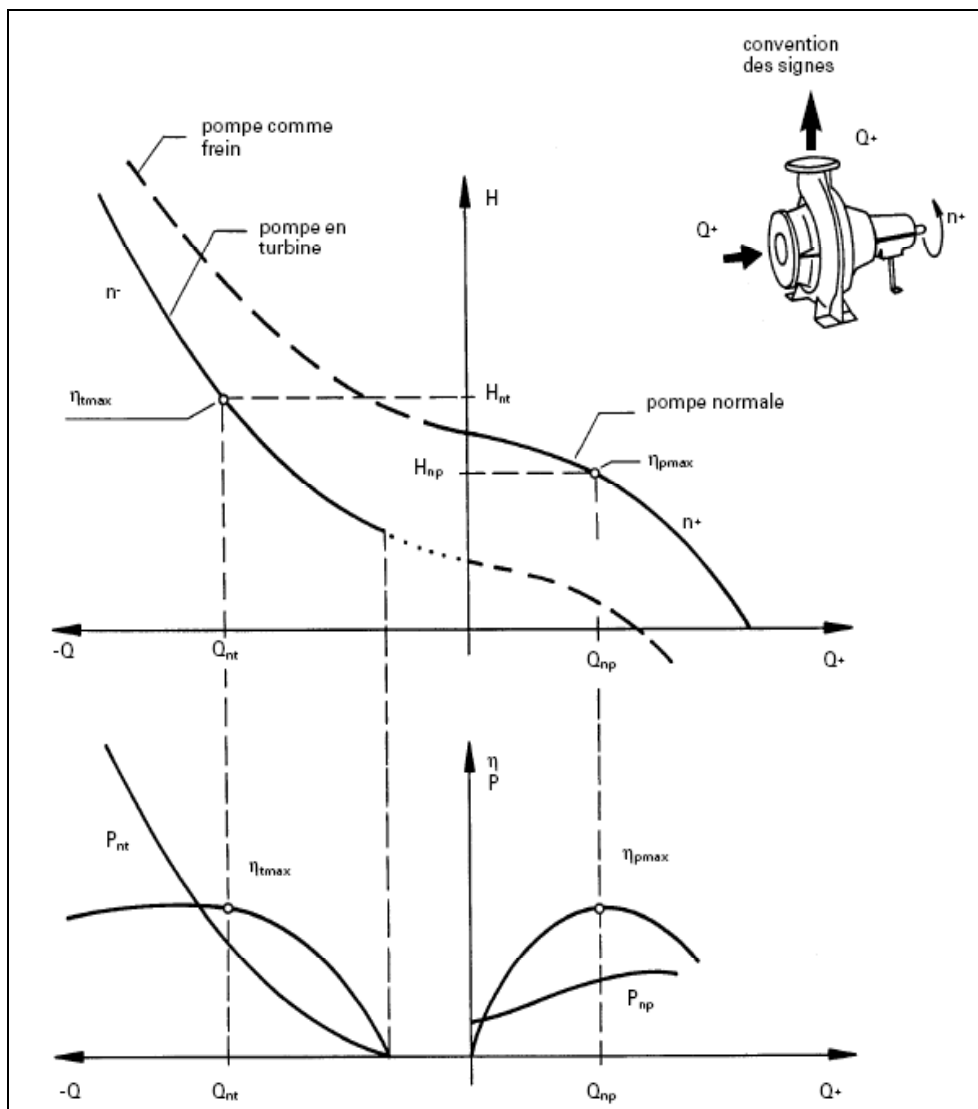


Figure 14 / Courbes caractéristiques complètes d'une pompe à vitesse de rotation constante [5]

Le rendement des pompes inversées est de 75 à 85%.

### 2.5.8 Multiplicateurs

Les multiplicateurs sont utilisés quand la turbine tourne en-dessous de 430 t/min. Les différents types sont :

- à arbres parallèles
- à engrenages coniques
- à courroie

Les multiplicateurs ne sont pas de simples réducteurs conventionnels. Leur conception est étudiée pour supporter des charges hydrauliques importantes.

### 2.5.9 Domaine de fonctionnement des turbines

Le choix du type de turbine dépend de la particularité du site.

Il dépend de

- La chute nette  $H_n$
- Le débit maximum ainsi que la variation de celui-ci
- La vitesse de rotation
- Le coût

Le graphique ci-dessous représente le domaine de fonctionnement des turbines. Pour les hautes chutes on utilisera plus particulièrement les turbines Pelton alors que les Kaplan seront dédiées aux basses chutes et les Francis les moyennes chutes.

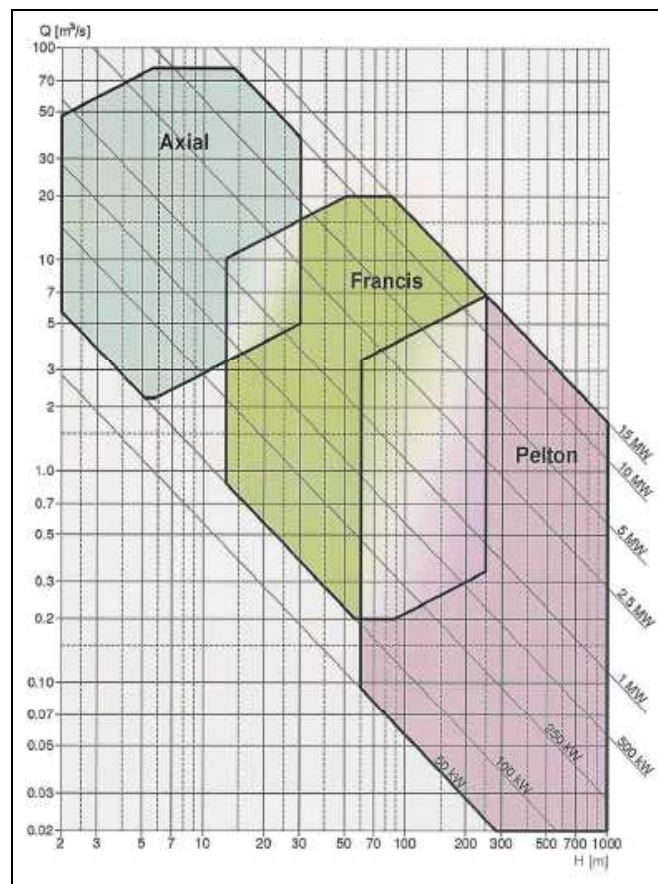


Figure 15 / Domaine de fonctionnement des turbines [7]

Un débit minimum est donné pour chaque type de turbine. En-dessous de ce débit les rendements chutent fortement et, selon le type de turbine, des phénomènes de cavitation, nuisibles à celle-ci, peuvent apparaître.

Type de turbine	Débit minimum (% du débit nominal)
Francis	50
Kaplan à simple réglage	25
Kaplan à double réglage	15
Pelton	10
Hélices	75

Figure 16 / Débit technique minimum des turbines [7]

### 2.5.10 Alternateurs

Il existe deux types machines électriques pour un raccordement au réseau électrique triphasé:

- Les machines synchrones
- Les machines asynchrones

#### 2.5.10.1 Machine synchrone triphasée

La machine synchrone est très répandue en tant que génératrice d'électricité. La gamme de puissance de ces machines va d'une dizaine de kVA à plus d'un millier de MVA. Les plus grosses machines sont utilisées dans des centrales nucléaires ou hydrauliques.

La machine synchrone est composée de deux éléments distincts :

- Le rotor, bobiné ou à aimants permanents, crée un champ fixe par rapport au rotor.
- Le stator, formé d'un empilage de tôles magnétiques muni d'encoches et d'un bobinage réparti, généralement triphasé, qui génère un champ magnétique tournant.

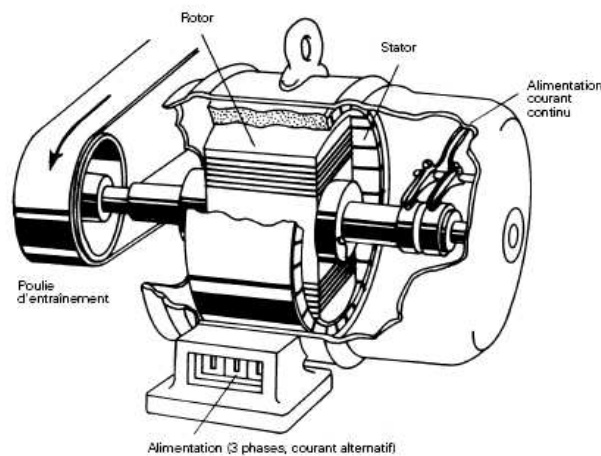


Figure 17 / Schéma d'une machine synchrone [8]

En fonctionnement moteur la vitesse de la machine synchrone est proportionnelle au champ tournant du stator et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles :

$$n_s = \frac{f}{p} \quad [\text{tours/s}] \quad [2.23]$$

Avec :

- $f$  : fréquence [Hz]
- $p$  : nombre de paires de pôles

En génératrice la fréquence électrique est donc fixée par la vitesse.

Le bilan de puissance, illustré à la figure 17, permet de déterminer la puissance fournie par la machine synchrone au réseau. En génératrice la puissance mécanique est égale à la puissance absorbée.

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{mec}} \quad [\text{W}] \quad [2.24]$$

Et les pertes sont déterminées par la puissance absorbée moins la puissance active  $P_{\text{utile}}$ .

$$P_{\text{abs}} - P_{\text{utile}} = \Sigma \text{Pertes} \quad [\text{W}] \quad [2.25]$$

La puissance active fournie au réseau s'exprime en fonction de la tension composée et du courant de ligne.

$$P_{\text{utile}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \cdot \cos\phi \quad [\text{W}] \quad [2.26]$$

Les pertes sont :

- Les pertes par frottement et ventilation
- Les pertes dans le circuit magnétique du stator, ou pertes fer. Ce sont les pertes par hystérèse et courants de foucault.
- Les pertes cuivres dans le stator
- Les pertes par effet joule dans le bobinage d'excitation

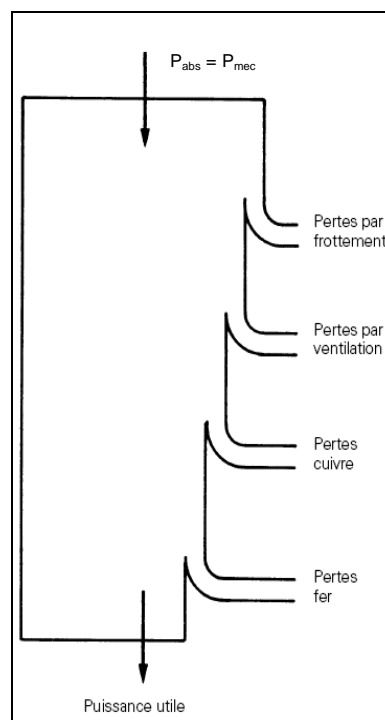


Figure 18 / Bilan de puissance [8]

Au moyen du bilan de puissance on peut déterminer le rendement qui est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{abs}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{utile}} + \Sigma \text{Pertes}} \quad [-] \quad [2.27]$$

Le démarrage de la machine dépend du mode de fonctionnement, le tableau ci-dessous illustre ceux-ci.

Fonctionnement en îlot	Fonctionnement en réseau interconnecté
<p>Démarrer le groupe au moyen de la turbine jusqu'à la vitesse synchrone.</p> <p>Régler le courant d'excitation du rotor par une source variable à courant continu afin d'atteindre la tension nominale aux bornes du stator.</p> <p>Enclencher le disjoncteur sur les consommateurs.</p>	<p>Démarrer le groupe au moyen de la turbine jusqu'à la vitesse synchrone.</p> <p>Régler le courant d'excitation du rotor par une source variable à courant continu afin d'atteindre la tension nominale aux bornes du stator.</p> <p>Vérifier que le sens du champ tournant soit le même entre la machine et le réseau.</p> <p>Ajuster la fréquence et la tension afin qu'elles soient identiques à celles du réseau.</p> <p>Lorsque les 2 systèmes triphasés sont en phase, enclencher le disjoncteur du réseau.</p>

Tableau 1 / Mode de démarrage de la machine synchrone

Réglage de la machine synchrone :

La machine peut être réglée facilement selon le mode de fonctionnement. Sur un réseau isolé il faudra bien entendu régler la fréquence, la tension alors que sur un réseau interconnecté dit rigide<sup>10</sup> on réglera l'échange de puissance avec le réseau.

### **2.5.10.1 Machine asynchrone triphasée**

La machine asynchrone, appelée aussi machine à induction, est plus largement utilisée en moteur. Cependant le fonctionnement en génératrice est possible en la faisant tourner à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme.

Ces avantages sont une construction mécanique simple et robuste et le rotor n'est raccordé à aucune source extérieure de tension sauf pour un utilisation particulière avec un rotor bobiné.

- Le stator est identique à la machine synchrone
- Le rotor peut être une cage d'écureuil ou bobiné

<sup>10</sup> Un réseau dit rigide est un réseau où la fréquence et la tension sont constantes et ne varient pas, ou très peu, quelle que soit la charge.

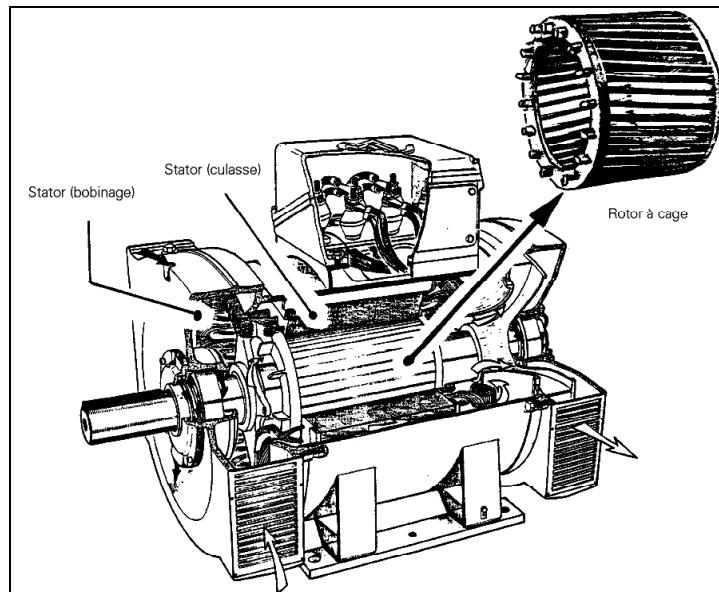


Figure 19 / Schéma d'une machine asynchrone [8]

Le stator crée un champ magnétique tournant dans l'entrefer à la vitesse angulaire synchrone  $\Omega_s$  et induit des courants alternatifs dans le rotor. L'interaction du champ créé par le courant du stator et du champ créé par le courant du rotor fait apparaître un couple. Le rotor démarre et se met à tourner dans le sens du champ. La vitesse du rotor est inférieure à la vitesse du champ tournant d'où le nom de machine asynchrone.

La différence de vitesse entre le rotor et le champ tournant, rapporté à la vitesse synchrone, est appelé le **glissement s**.

$$s = \frac{(\Omega_s - \Omega)}{\Omega_s} = \frac{(n_s - n)}{n_s} \quad [-] \quad [2.28]$$

Le domaine de fonctionnement de la machine asynchrone est illustré sur la figure 20.

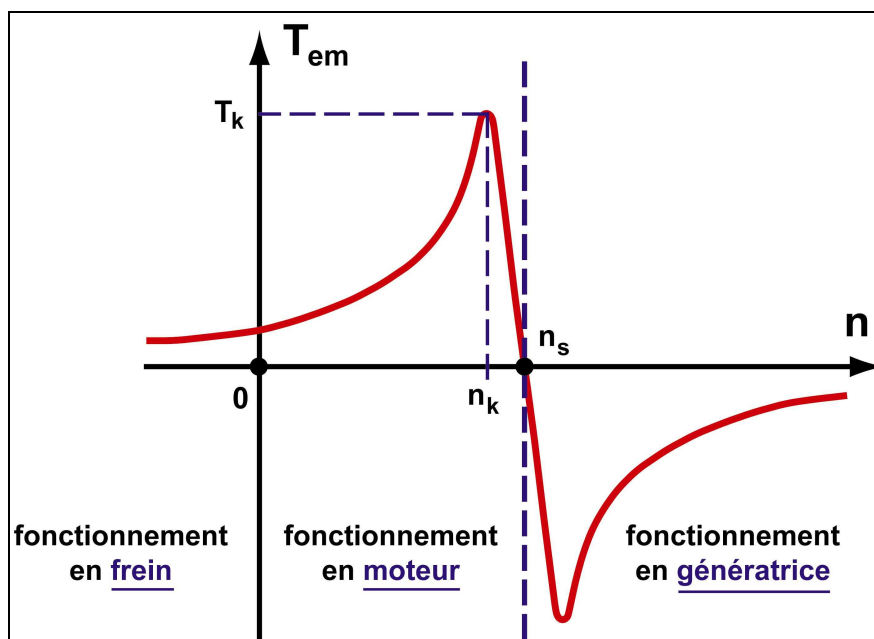


Figure 20 / Courbe de couple en fonction de la vitesse.[9]

Si la vitesse  $n$  était égale à  $n_s$ , il n'y aurait plus de déplacement relatif du champ tournant par rapport au conducteur du rotor, donc pas de courants induits dans le rotor et pas de couple moteur.

En génératrice, le glissement est négatif,  $n$  étant plus grand que  $n_s$ . Le rotor est en avance par rapport au champ tournant du stator, on doit fournir un couple à l'arbre par la turbine.

La machine asynchrone peut fonctionner en générateur avec les conditions suivantes:

- Elle doit être entraînée à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone
- Pour un fonctionnement nominal en génératrice, la puissance électrique sera légèrement inférieure à la puissance mécanique nominale en moteur.
- Le glissement sera proche, au signe près, du glissement nominal pouvant être déterminé grâce à la vitesse indiquée sur la plaque signalétique ( $\sim 3-6\%$ ).
- La machine asynchrone consomme toujours de la puissance réactive, aussi bien en moteur qu'en génératrice du fait que l'enroulement statorique est toujours l'enroulement exciteur. Cette puissance réactive sera fournie par le réseau ou par une batterie de condensateurs.
- Le  $\cos \varphi$  et le rendement sont inférieurs aux valeurs de fonctionnement en moteur (figure 21).

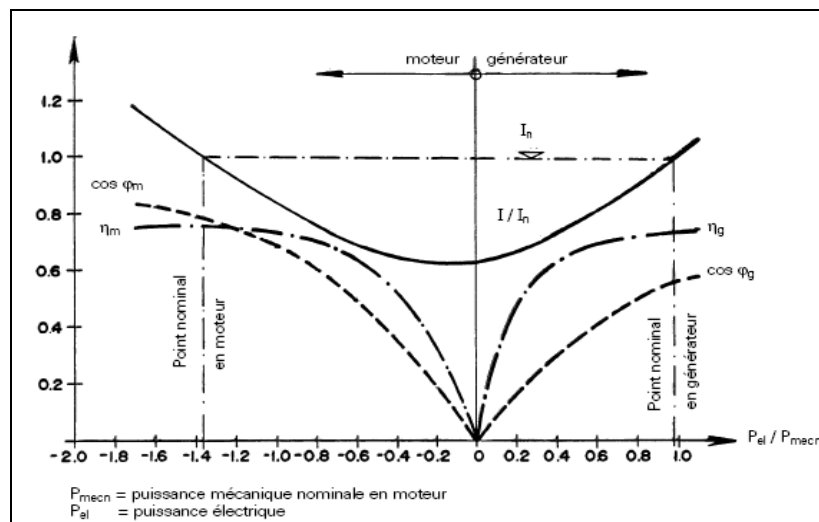


Figure 21 / Caractéristiques d'une machine asynchrone [8]

La puissance active fournie au réseau s'exprime en fonction de la tension composée et du courant de ligne.

$$P_{\text{utile}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ligne}} \cdot I_{\text{ligne}} \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad [2.29]$$

Mode de démarrage de la machine asynchrone :

Fonctionnement en îlot	Fonctionnement en réseau interconnecté
<p><i>Démarrer le groupe au moyen de la turbine jusqu'à la vitesse synchrone.</i></p> <p><i>Enclencher les capacités. Il se produit alors la montée en tension aux bornes du stator par le phénomène d'amorçage et auto-excitation.</i></p> <p><i>Enclencher le disjoncteur sur les consommateurs.</i></p>	<p><i>Démarrer le groupe au moyen de la turbine jusqu'à la vitesse synchrone.</i></p> <p><i>Enclencher le disjoncteur ou le contacteur permettant de coupler la génératrice asynchrone au réseau. Une pointe de courant (environ 5 fois le courant nominal) apparaîtra au moment de l'enclenchement. La machine asynchrone est capable de supporter cette surintensité temporaire <sup>11</sup>. Cependant, les protections doivent être prévues en conséquence.</i></p> <p><i>Enclencher la batterie de condensateurs, s'il y a compensation du facteur de puissance.</i></p> <p><i>Pour augmenter la charge active fournie au réseau, augmenter le débit d'eau dans la turbine.</i></p>

Tableau 2 / Mode de démarrage de la génératrice asynchrone

La machine asynchrone est caractérisée, en mode interconnecté, par la courbe de couple à la fig.20 qui représente la variation de la vitesse en fonction du couple.

La variation du  $\cos \varphi$ , du courant, et du rendement en fonction de la puissance fournie sont illustrés à la fig.21.

Le réglage de la puissance active fournie par la génératrice se fait par la régulation du débit.

<sup>11</sup> Une possibilité est de coupler au réseau la machine avec un variateur de vitesse afin de limiter cette pointe de courant.

## 2.6 Régulation

Un paramètre important de la régulation est la vitesse de rotation de la turbine. En effet la fréquence du courant doit respecter les normes du réseau électrique<sup>12</sup>.

Les moyens de maintenir la vitesse des machines sont [10] :

- Par le réseau électrique
- Par un régulateur électronique à charge ballast
- Par un régulateur vitesse-débit

Le mode de régulation qui nous intéresse dans la production d'électricité sur les réseaux d'eau potable, où un fonctionnement en îlot n'est pas nécessaire, est la régulation par le réseau électrique. Le réseau fixe la fréquence du courant donc de la vitesse de rotation de la turbine. Le réglage contrôle le niveau de mise en charge amont à une valeur constante en adaptant le débit de la turbine.

Ce mode de régulation permet de valoriser tout le potentiel hydraulique disponible. De plus en régulant le niveau amont on se prémunit contre une infiltration d'air dans la conduite qui pourrait créer des perturbations dommageables pour les installations (chocs, vibrations, coups de bélier).

La mesure de niveau nécessite une transmission des données analogiques entre la chambre de mise en charge et l'installation de turbinage. Celle-ci peut être transmise au moyen d'un câble de cuivre ou par liaison sans-fil. Le choix d'une liaison sans-fil se fera pour une installation dont on ne changera pas la conduite et où aucun moyen de télé-transmission n'est existant afin de limiter les travaux de génie-civil.

La liaison sans-fil peut-être, soit des modules radio qui utilisent la gamme de fréquences de 433 ou 869 MHz, soit une liaison GSM et plus particulièrement GPRS. La liaison doit être constante entre les deux sites. En cas de perte de transmission l'automate doit arrêter la turbine. L'alimentation en eau sera par contre assurée par la vanne de by-pass.

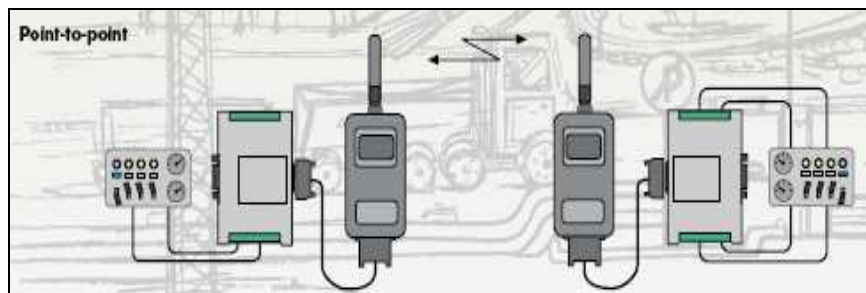


Figure 22 / Transmission radio point-to-point [14]

<sup>12</sup> 50 [Hz] pour le réseau suisse.

## 3 Raccordement au réseau électrique

### 3.7 Demande et approbation de projet

Pour les installations d'une puissance égale ou supérieurs à 3 kVA en monophasé et 10 kVA en triphasé, le raccordement au réseau électrique doit faire l'objet d'une demande d'approbation de projet de production d'énergie à l'inspection fédérale des courants forts<sup>13</sup>.

Après l'acceptation du projet par l'ESTI, une demande de raccordement pour une installation électrique, pour mise en parallèle avec le réseau de distribution, doit être effectuée auprès de l'exploitant de réseau.

Avant la réalisation du projet un avis d'installation sera transmis à l'exploitant de réseau, et à la remise de l'installation au propriétaire, celle-ci sera contrôlée selon les normes OIBT et un rapport de sécurité rempli par un contrôleur agréé.

### 3.8 Normes et Prescriptions

Les centrales de production d'électricité doivent respecter aussi bien l'ordonnance sur les installations à basse tension<sup>14</sup> que les prescriptions des distributeurs d'électricité de Suisse romande<sup>15</sup>, qui complètent cette ordonnance.

Ces ordonnances et prescriptions dictent les modalités pour les installations à basse tension. Elles décrivent plus particulièrement le choix du matériel et la sécurité des installations.

La sécurité comprend la protection des personnes et du matériel.

*« Les installations électriques doivent être établies, modifiées, entretenues et contrôlées selon les règles techniques reconnues. Elles ne doivent mettre en danger ni les personnes ni les choses lorsque leur exploitation et leur utilisation sont correctes et si possible aussi lorsque les règles à ce sujet sont enfreintes de manière prévisible, ou encore en cas de dérangement prévisible »<sup>16</sup>.*

### 3.9 Conditions techniques de raccordement

#### 3.9.1 Facteur de puissance

Le facteur de puissance,  $\cos \varphi$ , ne doit pas être inférieur à 0.9 [11]. Pour régler le facteur de puissance on effectue, avec une machine synchrone, un réglage de la puissance échangée en variant le courant d'excitation. Pour la machine asynchrone, qui absorbe toujours de la puissance réactive, on ajoute une batterie de compensation composée de condensateurs.

La valeur du condensateur par phase est donnée par la formule suivante :

$$C_{\text{phase}} = \frac{P_{\text{fournie}} \cdot (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)}{3 \cdot \omega \cdot U_{\text{C phase}}^2} \quad [\text{F}] \quad [3.30]$$

Les condensateurs sont connectés en triangle.

<sup>13</sup> ESTI Romandie à Lausanne.

<sup>14</sup> OIBT, Ordonnance du 7 novembre 2001 sur les installations à basse tension.

<sup>15</sup> PDIE, Prescriptions de distributeurs d'électricité de Suisse romande, Installations électriques à basse tension.

<sup>16</sup> Article 5 de l'OIBT.

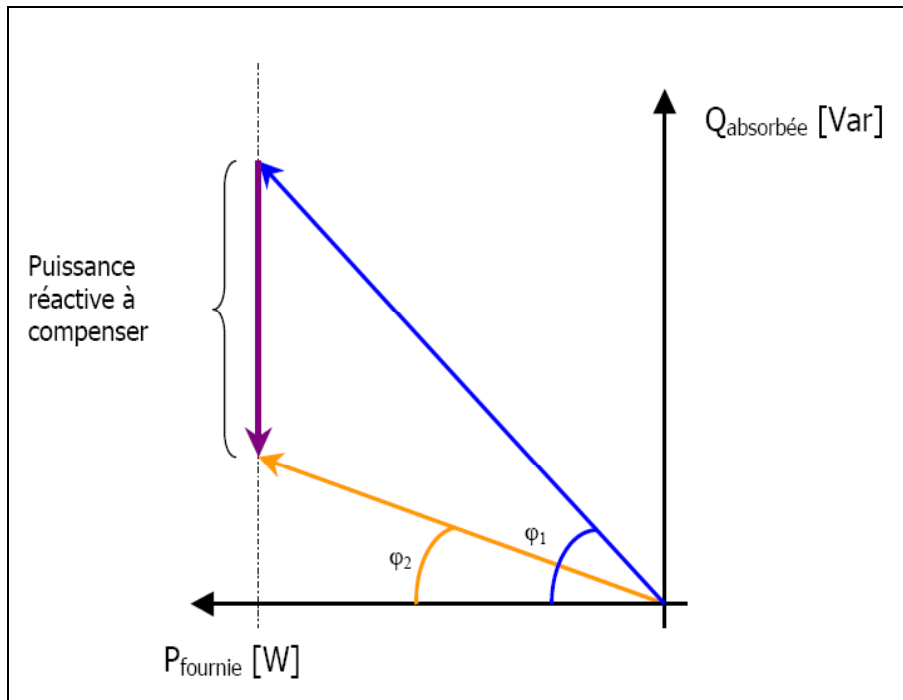


Figure 23 / Compensation du facteur de puissance

Une autre possibilité pour compenser la puissance réactive est d'utiliser de l'électronique de puissance avec des convertisseurs. Un procédé qui a l'avantage de se régler plus facilement par rapport à la quantité de puissance réactive à compenser, mais il est plus onéreux qu'une batterie de compensation à condensateurs.

En cas de défaut sur la génératrice ou sur le réseau de distribution, l'installation de compensation devra être déclenchée.

### 3.9.2 Point de sectionnement

Afin de garantir la sécurité lors d'une intervention sur le réseau électrique déclenché, un point de sectionnement doit être accessible en tout temps par les personnes autorisées.

### 3.9.3 Mise en parallèle avec le réseau

Il est obligatoire de mettre un interrupteur de couplage à verrouillage mécanique pour la mise en parallèle avec le réseau. Il permet de séparer immédiatement l'installation en cas de défaut sur le groupe générateur ou aussi en cas de défaut sur le réseau. Il permet aussi d'assurer la sécurité dans le cas d'un réseau hors tension.

### 3.9.4 Surveillance et protection

La protection doit comprendre :

- Un contrôle de la surintensité et surtension sur toutes les phases.
- Un interrupteur de couplage devant séparer, du réseau, tous les pôles et supportant le courant de court-circuit.
- Lors d'une coupure brève de réseau, l'installation peut être réenclenchée avec une temporisation retardée.

## 4 L'étude de Potentiel

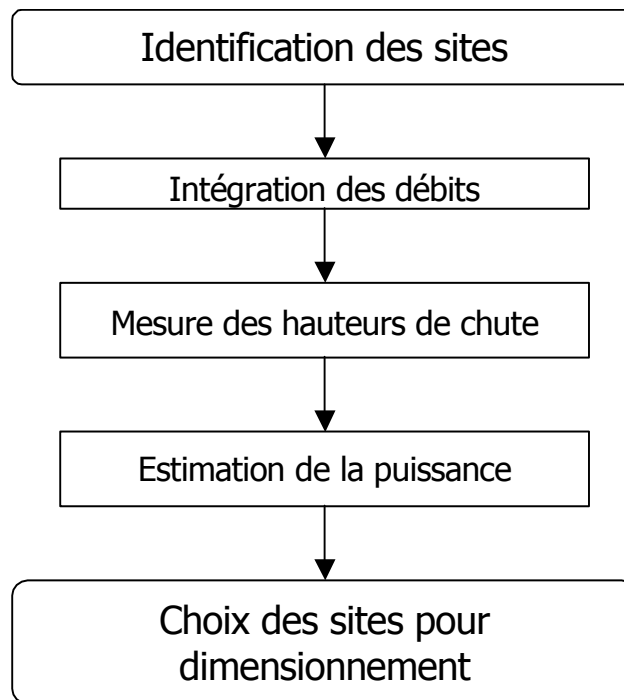


Figure 24 / Organigramme de l'étude de potentiel

### 4.10 Identification des sites potentiels

L'évaluation du potentiel se base sur les éléments suivants [12] :

- Le débit
- La hauteur de chute entre la chambre de mise en charge et la chambre de restitution
- La longueur de la conduite

L'identification des sites potentiels s'est effectuée d'après le plan de profil en long du réseau et en collaboration avec la pilote de réseau Mme Hernell. Tous les sites comme les chambres coupe-pression, les vannes de réduction de pression, et les réservoirs ont été répertoriés dans un fichier Excel pour une sélection (voir annexe A.2 et A.3).

Différents critères sont déterminants, comme le débit, la hauteur de chute, l'emplacement géographique, la disponibilité d'un réseau électrique assez proche.

Après analyse du fonctionnement du réseau, des sites ont été écartés assez vite de par leurs particularités. Soit les débits étaient beaucoup trop faibles et les puissances envisagées étaient de l'ordre du kW, soit ils étaient trop éloignés d'habitations, ou un réseau électrique n'était pas disponible tout proche des ouvrages.

Sur un total de 58 sites répertoriés, quatre présentent une puissance supérieure à 100 kW et deux ont une puissance estimée entre 10 et 20kW.

Les sites ayant une puissance inférieure ne peuvent être utilisés pour une production avec revente sur le réseau électrique, le coût des installations serait trop élevé pour pouvoir rentabiliser l'investissement.

Tous les calculs effectués pour le remplacement des conduites utilisent le tracé actuel des conduites.

### **4.11 Débits**

Les débits sont importés depuis une base de données au format Microsoft® Access nommée *Consulte\_2000* qui contient les débits des sources, réservoirs, chambre CCP, de pompage, depuis 1996. Ils ont été traités et mis en forme pour former les courbes de débits classés.

Les débits du réseau sont relevés sur sites selon plusieurs méthodes, soit :

- Par un débitmètre disposé sur la conduite
- Par une sonde de niveau sur un déversoir
- Par un limnigraphe à flotteur

Pour les mesures de niveau et mesures de débitmètre elles sont généralement télétransmises chaque jours sur la supervision Rittmeyer ce qui représente 365 mesures par an. Pour les autres, les mesures sont effectuées tous les sept jours environ ce qui représente 50 points de mesures, et la précision est un peu moins bonne car on mesure le niveau sur une feuille du limnigraphe avec une règle graduée, et à l'échelle. La précision des mesures télétransmises est de  $\pm 4\%$ . Pour le limnigraphe il est plus difficile d'estimer la précision mais une fourchette de  $\pm 8\%$  est tout à fait admissible.

Pour une étude de potentiel le nombre de ces mesures ainsi que leur précision sont tout à fait acceptables et suffisent pour établir une estimation de l'énergie disponible ainsi que du prix de revient du kWh.

Les courbes de débits classés ont été élaborées sur la base des années 2003 - 2004<sup>17</sup>, et moyennées. Afin de déterminer la précision des courbes élaborées, un contrôle a été effectué avec une moyenne établie sur six ans et l'écart qui apparaît est de moins de 8% sur l'ensemble des deux courbes.

Pour une étude d'avant-projet et projet, il sera nécessaire de prendre toutes les mesures de débits à disposition afin d'avoir des courbes de débits classés plus précises et d'établir aussi des courbes de débits partielles car les tarifs de revente de l'électricité varient selon la saison et selon les heures journalières<sup>18</sup>.

Les courbes de débit classés ont été mise en forme pour une utilisation dans le logiciel RETscreen. Celui-ci utilise le débit atteint par tranches de 5% du nombre de jours annuels.

Pour les demandes d'offres, le débit nominal d'équipement est celui correspondant à environ Q70. En effet pour une interconnexion avec le réseau le but est de fournir un maximum d'énergie donc de prendre le débit le plus élevé possible. Toutefois l'aspect économique dictera aussi le débit nominal d'équipement.

### **4.12 Hauteur de chute**

La hauteur de chute a été déterminée à l'aide du profil en long et du schéma au 1/5000 qui contiennent toutes les cotes d'altitude des ouvrages.

### **4.13 Choix des sites pour dimensionnement**

La sélection de quatre ouvrages pour un pré-dimensionnement s'est faite par rapport à la puissance envisagée. La puissance a été calculée avec le débit moyen, des pertes de charge de 7% et d'un rendement global turbine - générateur d'une valeur de 0.85 en première hypothèse.

La sélection s'est portée sur les sites présentant la puissance la plus importante. La puissance estimée étant supérieure à 100kW pour les quatre ouvrages.

Les sites retenus sont les chambres CCP de Fontanivent, Sollard et Bignièrès toutes ainsi que le trop-plein de la source du Bouveret. Leur chute brute étant supérieure à 100m, le choix de turbines Pelton s'est avéré être le plus pertinent.

---

<sup>17</sup> Les données 2005 étaient incomplètes.

<sup>18</sup> Voir les tarifs annexés de la Romande énergie. Annexes A.18 et A.19.

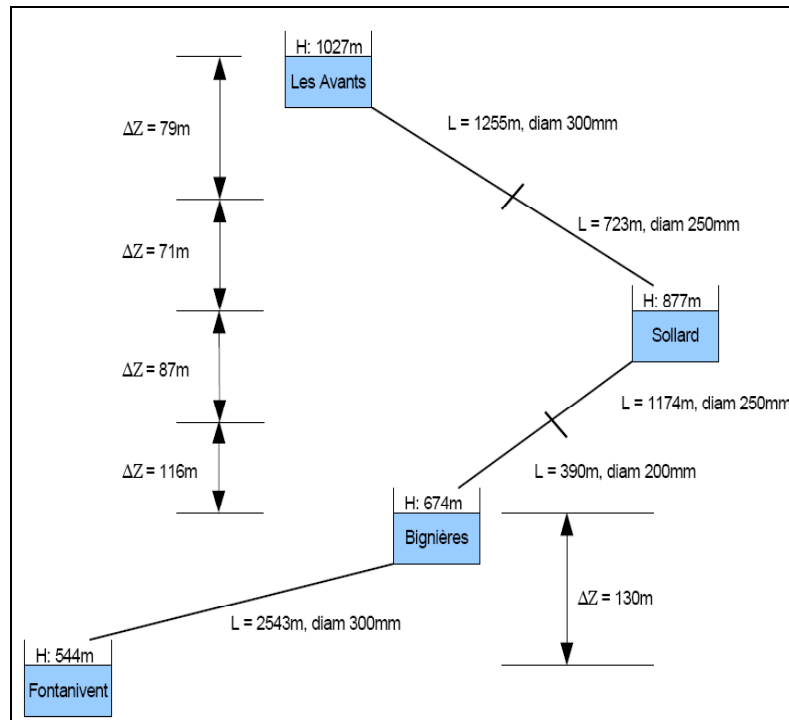


Figure 25 / Disposition schématique des ouvrages sur la conduite qui va des Avants à Fontanivent

Les choix des sites ainsi que les calculs effectués ne tiennent pas compte de la résistance mécanique des conduites. Pour une utilisation des conduites actuelles, la mise en pression de certaines conduites devra être effectuée afin de déterminer leur résistance.

Le calcul du prix de revient du kWh tient compte de nouvelles conduites avec différents diamètres et ne reprend pas les conduites actuelles car les pertes de charge ne sont pas valables pour certaines conduites et la mesure de pression n'a pas été possible dans le cadre de ce diplôme.

#### 4.14 Demandes d'offres

Les offres pour l'électromécanique comprennent la turbine, la génératrice, vanne d'isolement et les armoires électriques.

Une demande pour des prix pour plusieurs variantes a été faite et à différents débits. Mais suite à un entretien téléphonique avec M. Maillardet de la société Ecowatt la demande a été restreinte à un seul débit car le temps nécessaire pour le calcul de l'offre serait trop élevé pour une possibilité de contrat trop incertaine pour eux. Seule la société Ofatec, à La Conversion, a répondu à ma demande d'offre. Sur cette base ont été estimé le prix du kW de l'électromécanique pour les puissances ne figurant pas dans l'offre.

Les machines proposées sont des turbines pelton à axe vertical, profil Mhylab et deux injecteurs, provenant de la société THEE en France. Elles sont en acier inoxydable et les augets sont usinés.

Le profil Mhylab permet d'obtenir des rendements supérieurs à un profil conventionnel. Ce profil est le résultat de recherches et développements en laboratoire. D'un coût supérieur il permet néanmoins d'améliorer l'efficacité de la machine donc d'augmenter l'énergie produite.

## 4.15 Calcul du prix de revient

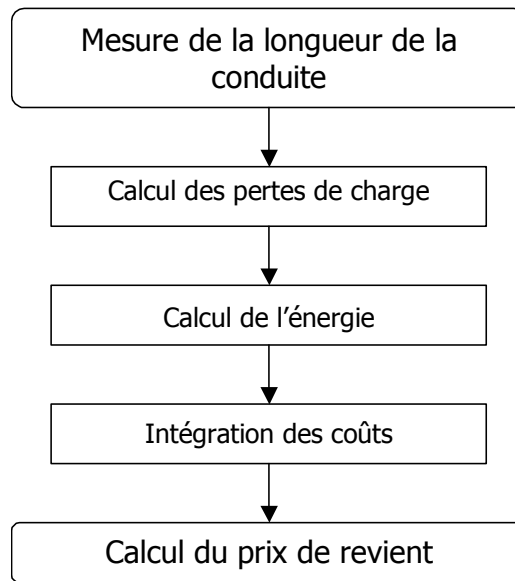


Figure 26 / Organigramme du calcul de prix de revient

Le calcul complet est présenté ci-après pour la chambre coupe-pression de Bignièrès.

### 4.15.1 Chambre coupe-pression de Bignièrès

La chambre coupe-pression de Bignièrès se situe à une altitude de 674m sur la conduite qui mène de la CCP de Sollard à la CCP de Fontanivent. La conduite est composée de deux tronçons de diamètres différents, un tronçon de 250mm et le deuxième de 200mm. Le débit maximum est d'un peu plus de 12'000 l/min, la hauteur brute de 203m et la longueur totale de la conduite de 1564m. Le débit pour la demande d'offre était de 190 l/s.

#### 4.15.1.1 Pertes de charge

Pour le calcul des pertes de charge la méthode Colebrook - White a été utilisée puis les valeurs ont été vérifiées par Maning – Strickler car les rendements obtenus des conduites sont négatifs pour certaines portions de conduite.

La méthode Colebrook-White nécessite de connaître, ou estimer, la rugosité . Celle-ci est très difficile à estimer correctement car la conduite n'a pas été remplacée ou réparée depuis des décennies et l'on ne connaît pas son état. Une valeur arbitraire , et assez élevée, de 3mm a été prise en compte pour les calculs.

Maning – Strickler, avec un facteur K de valeur égal à 85 [15], vérifie bien les résultats de la première méthode ce qui signifie que nous sommes dans un régime ultra-turbulent où les modèles mathématiques de calcul de pertes de charge ne sont plus applicables.

Jusqu'à 12'000 l/min passent, sur certains tronçons, par des diamètres de conduites de 200mm ce qui donne des vitesses très élevées approchant 6.3 m/s. Les pertes de charge étant fonction du carré de la vitesse, celles-ci deviennent beaucoup trop importantes par rapport à la chute brute.

La mesure de pression est un moyen d'obtenir des valeurs exploitables pour les conduites existantes, malheureusement il n'existe aucun point de mesure, vidanges, bornes hydrantes, etc. sur la conduite qui va des Avants à Fontanivent et donc il n'a pas été possible de faire ces mesures dans le cadre de ce diplôme.

Les calculs ont donc été effectués sur des conduites, en remplacement de celle existante, avec des diamètres de 300 à 500 mm. Les rendements sont illustrés sur la figure 27.

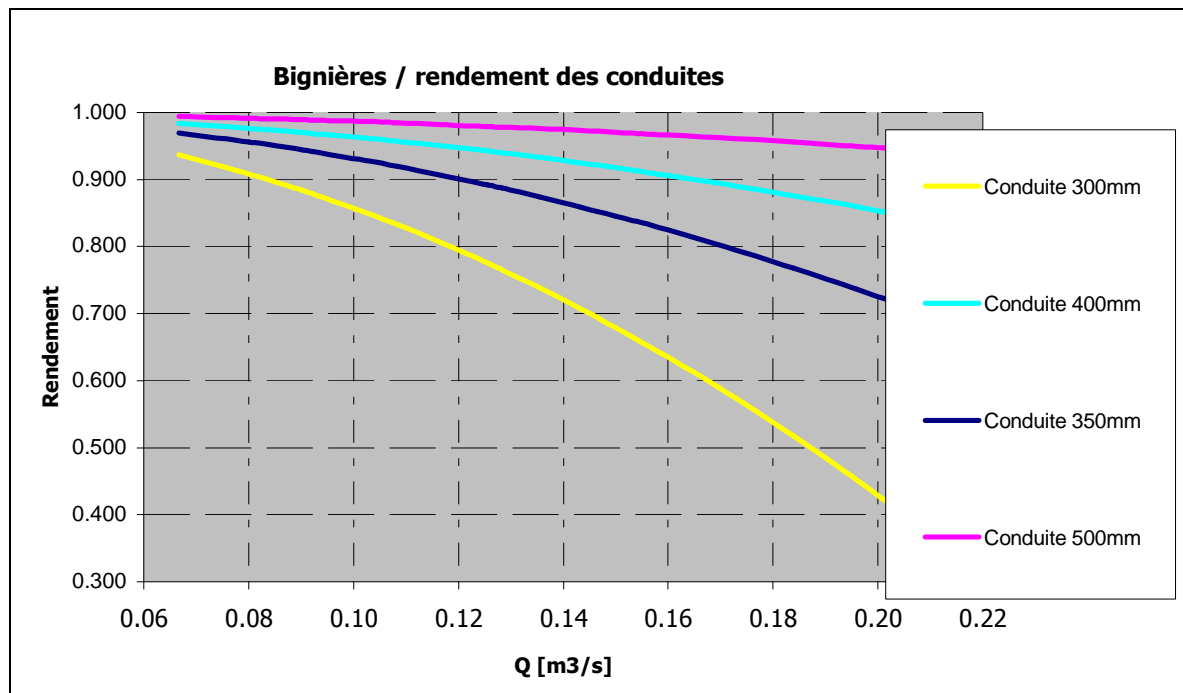


Figure 27 / Rendement des conduites de Bignières

On voit que les conduites en-dessous de 400mm présentent, au débit nominal de 0.19 m<sup>3</sup>/s, des rendements inférieurs à 75%. La seule conduite présentant un rendement supérieur à 90% est la conduite de 500mm.

#### 4.15.1.2 Calcul de l'énergie

Le calcul de l'énergie, annexe A.6, a été effectué sur la base des courbes de débits classés préparées pour RETScreen. Le débit maximum est le débit donné pour les demandes d'offres.

L'énergie annuelle nette correspond à l'intégration de la variation de la puissance sur l'année.

$$E_{\text{électrique annuelle}} = \int_0^{365j} P_{\text{élec}} \cdot dt \quad [\text{Wh/an}] \quad [4.31]$$

La puissance est calculée avec la formule 2.16 au chapitre 2.5.1. Pour calculer la puissance le débit maximum est le débit nominal d'équipement donné pour les offres.<sup>19</sup>

Pour l'estimation de l'énergie, l'intégrale est simplifiée par des surfaces rectangulaires représentées sur le graphique de la figure 28, le nombre de jours atteints par le débit de chaque tranche est le nombre de jours annuels divisé en vingt parts égales. Le fonctionnement de la machine est considéré disponible à 100 % de l'année .

<sup>19</sup> Voir le graphique de la figure 28 à la page 36

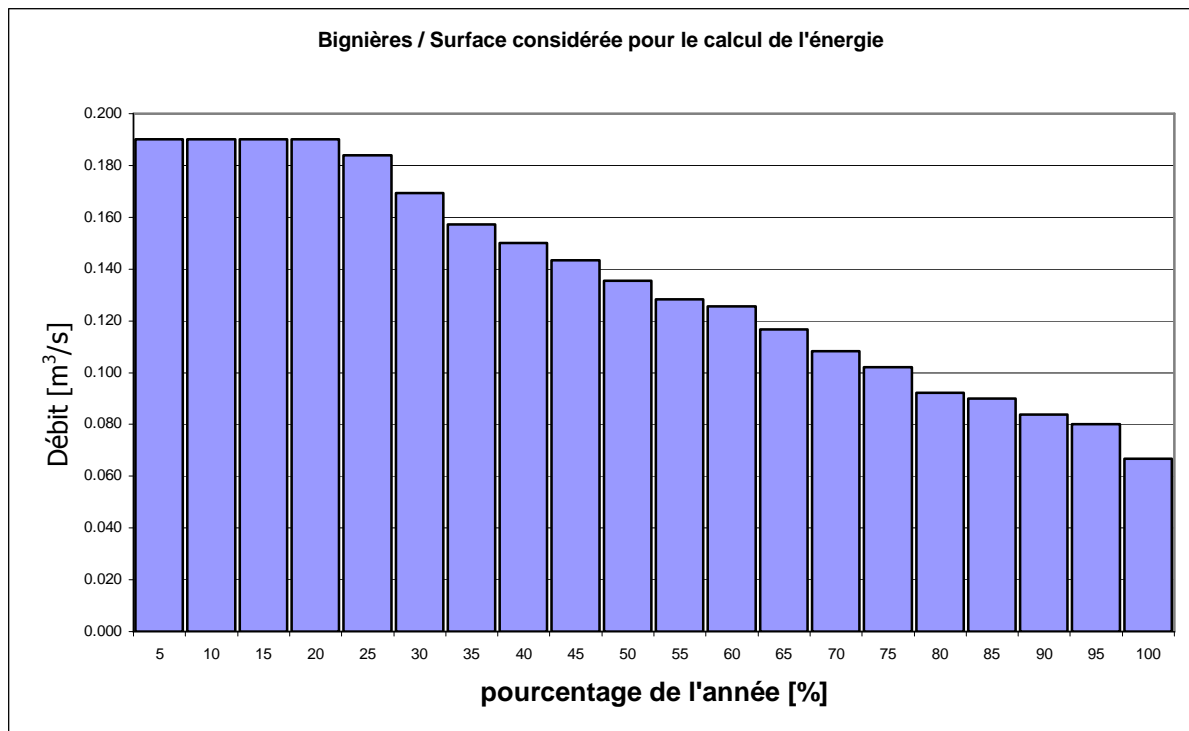


Figure 28 / Intégrale simplifiée

Les rendements des conduites sont ceux effectués par la méthode Strickler, ceux des turbines sont issus du logiciel RETscreen et les rendements des génératrices sont issus de moteurs asynchrones VEM diminués de 2 points car étant en fonctionnement en génératrice.<sup>20</sup>

Le tableau 3 ci-dessous, indique l'énergie disponible pour chaque site et avec chaque variante de diamètre de conduite.

	<b>Énergie disponible [kWh]</b>			
	<b>300mm</b>	<b>350mm</b>	<b>400mm</b>	<b>500mm</b>
Sollard		936'651	1'118'956	1'247'938
Bignières	1'257'708	1'612'840	1'765'780	1'878'676
Fontanivent	586'014	815'560	1'007'172	1'145'094
Bouveret	415'324	459'001	478'245	478'245

Tableau 3 / Énergie disponible

L'énergie disponible maximum pour la CCP de Bignières, avec le tracé actuel de la conduite, est de 1.88 GWh.

<sup>20</sup> Voir courbe de rendement de la figure 21 à la page 26

### 4.15.1.3 Coûts de l'installation

Les coûts , annexe A.8, sont basés sur des demandes d'offres budgétaires. Leur estimation est à ± 10%.

Le prix de la fouille est celui correspondant au remplacement d'une conduite sous une route et comprend donc le remblayage et pose de l'enrobé.<sup>21</sup> Pour une fouille dans un terrain herbeux le prix sera inférieur à celui budgété. Nos conduites suivent le tracé routier donc l'ensemble de la fouille a été compté à 210.-/m. Le prix de la conduite pour l'estimation des coûts est le prix du remplacement complet de celle-ci et pas seulement le surcoût dû à l'augmentation du diamètre de la conduite pour du turbinage.

La part de l'investissement pour l'adaptation du bâtiment correspond à 10% du prix de l'électromécanique.<sup>22</sup>

Le prix de l'électromécanique est basé sur les offres reçues par la société Ofatec. Le prix a été estimé pour les puissances ne correspondant pas à celles offertes.

Le prix des conduites est une offre faite par téléphone avec la société Wild, notre fournisseur en conduites et accessoires de conduites. La conduite est à emboîtements auto-étanches avec double chambre. Elle est en fonte ductile avec un revêtement en PE.

Le prix des accessoires pour la conduite est une estimation basée sur les chantiers effectués sur notre réseau. Pour base on compte 10% du prix de la conduite.

Les offres de la romande énergie comprennent une station transformatrice, le raccordement sur le réseau étant effectué sur un réseau moyenne tension pour l'ouvrage de Bignièrès, et les liaisons au réseau.

A cela il faut ajouter la taxe de raccordement de 195.-/A et le prix de la fouille de liaison, compté aussi à 210.-/m.

Le courant, calculé pour la taxe, correspond à deux fois la puissance installée plus 10% pour les auxiliaires.

*Exemple : si la puissance est de 100kW, le courant sera de 200A + 20A pour les auxiliaires ce qui fait un total de 220A. Ces valeurs sont utilisées dans la pratique et sont vérifiées par les données techniques des fabricants de moteurs.*

### 4.15.1.4 Frais d'exploitation

Les frais d'exploitation sont faibles pour des installations sur de l'eau potable. Pour le calcul des frais d'exploitation annuels , le montant est déterminé avec une proportion de l'investissement. Les valeurs sont les suivantes :

- Génie-civil et conduite : 1% de l'investissement pour le génie-civil
- Électromécanique : 1% de l'investissement pour l'électromécanique

### 4.15.1.5 Prix de revient et bénéfice

Le prix de revient du kWh, annexe A.8, a été calculé à l'aide de la formule du calcul des annuités. Il sert à déterminer l'amortissement et les frais d'exploitations annuels :

$$A = I \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad [\text{SFr.}] \quad [4.32]$$

<sup>21</sup> Couche supérieure de la chaussée

<sup>22</sup> Prix inspiré des coûts de construction de la centrale sur l'eau potable de la Rasse, communes d'Évionnaz et St-Maurice, VS

Avec :

I : Investissement [SFr.]

n : nombre d'années de l'amortissement

i : intérêt – inflation, fixé à 3%

Le nombre d'année d'amortissement a été déterminé comme suit :

- Génie-civil et conduite : 30 ans
- Électromécanique : 25 ans
- Appareillage : 12 ans

L'amortissement de la conduite peut être effectué sur un temps plus long , au vu de la durée de vie des conduites existantes. Pour le diplôme le choix s'est porté d'amortir la conduite sur la même durée que le génie-civil.

Le prix de revient a été calculé selon deux variantes :

- La première tient compte de l'investissement pour le remplacement de la conduite.
- La seconde ne tient pas compte de l'investissement pour le remplacement de la conduite si celui-ci est considéré comme un maintien de la valeur du réseau et que l'on envisage de remplacer la conduite.

Le bénéfice annuel calculé est celui obtenu avec un tarif de rachat moyen à 15 centimes le kWh. L'obtention d'un label de qualité permettrait d'augmenter la marge de bénéfice.

Le meilleur prix de revient, et bénéfice, est celui de la conduite de 500mm, mais la différence entre celui-ci et le prix de revient avec la conduite de 400mm est infime.

#### **4.15.1.6 Analyse économique**

Une méthode d'analyse économique et la méthode dite statique du temps de retour brut sur investissement [7]. Elle détermine le nombre d'années nécessaire pour couvrir le capital investi grâce aux recettes nettes du projet. Le nombre d'années nécessaire est appelé le temps de retour brut, ou temps de recouvrement. Le calcul est le suivant :

$$\text{Temps de retour} = \text{coût d'investissement} / \text{recette nette annuelle} \quad [\text{an}] \quad [4.33]$$

Ce ratio néglige généralement le coût d'accès au capital investi. Le coût d'accès au capital investi exprime le gain financier espéré en utilisant les ressources financières mobilisées par le projet sur un placement financier alternatif. Pour que le projet soit considéré comme rentable le temps de retour ne doit pas excéder, en règle générale, 7 ans pour les mini-centrales hydrauliques [7].

Les calculs établis pour ce diplôme sont effectués avec un amortissement 25 ans pour l'électromécanique. Avec une valeur du temps de retour brut sur l'investissement inférieur à cette période, on peut considérer l'installation rentable.

Les projets avec des temps de retour très courts donnent la possibilité de reconstituer les fonds propres rapidement. Le meilleur temps de retour conduite comprise est, pour la variante avec une conduite de 400mm, de treize ans. Sans la conduite il descend à 6 ans.

La même méthodologie de calculs a été utilisée pour les trois autres ouvrages. La suite du rapport ne comportera que les résultats et analyses des calculs. Le tableau 4 reprend les valeurs des variantes les plus intéressantes financièrement des quatre sites.

	Sollard		Bignières	
	Conduite 500mm		Conduite 400mm	
	Prix avec conduite	Prix sans conduite	Prix avec conduite	Prix sans conduite
Investissement total	SFr. 2'353'686	SFr. 1'242'050	SFr. 1'872'512	SFr. 1'131'176
Énergie fournie [kWh]	1'247'938	1'247'938	1'765'780	1'765'780
Frais d'exploitation annuels	SFr. 152'084	SFr. 81'761	SFr. 121'680	SFr. 74'962
Prix de revient du kWh	0.122	0.066	0.069	0.042
Bénéfice annuel pour une reprise à un prix moyen de 0.15 frs/kWh	SFr. 35'107	SFr. 105'430	SFr. 143'187	SFr. 189'905
Temps de retour brut sur investissement tarif non labellisé [an]	67	12	13	6

	Fontanivent		Bouveret	
	Conduite 400mm		Conduite 300mm	
	Prix avec conduite	Prix sans conduite	Prix avec conduite	Prix sans conduite
Investissement total	SFr. 1'813'832	SFr. 608'450	SFr. 904'662	SFr. 579'650
Énergie fournie [kWh]	1'007'172	1'007'172	415'324	415'324
Frais d'exploitation annuels	SFr. 117'318	SFr. 41'355	SFr. 59'122	SFr. 38'757
Prix de revient du kWh	0.116	0.041	0.142	0.093
Bénéfice annuel pour une reprise à un prix moyen de 0.15 frs/kWh	SFr. 33'758	SFr. 109'721	SFr. 3'177	SFr. 23'542
Temps de retour brut sur investissement tarif non labellisé [an]	54	6	285	25

Tableau 4 / Résumé des variantes présentant le meilleur temps de retour brut sur l'investissement

#### 4.15.2 Chambre coupe-pression de Sollard

La chambre coupe-pression de Sollard se situe à une altitude de 877m sur la conduite qui mène de la source des Avants à la chambre coupe-pression de Bignières. La conduite est aussi composée de deux tronçons de diamètres différents, le premier est en 300mm et le second en 250mm. Le débit maximum est de plus de 12'000 l/min, la hauteur brute est de 150m et la longueur de la conduite de 1978m. Le débit pour demande la demande d'offre était de 190 l/s.

La variante la plus intéressante est celle ayant une conduite de 500mm. Mais le temps de retour brut sur l'investissement est relativement élevé en incluant le prix de la conduite.

Un moyen d'améliorer le rendement énergétique serait de déplacer le tracé de la conduite afin d'éviter les coudes qui génèrent des pertes de charge importantes. Mais une étude plus poussée doit être faite car le relief du terrain n'est pas vraiment propice à un déplacement de la conduite.

Le raccordement électrique se fait sur le réseau moyenne tension. L'implantation d'une station transformatrice nécessite des travaux de génie-civil importants et le terrain d'emplacement de la CCP est relativement petit. Le coût de terrassement n'est pas compris dans le l'investissement.

L'énergie maximum disponible pour la CCP de Sollard, avec le tracé actuel de la conduite, est de 1.25 GWh<sup>23</sup>.

Le calcul des investissements ainsi que le prix de revient se trouvent sur l'annexe A.9.

<sup>23</sup> Tableau 3 page 36

#### **4.15.3 CCP de Fontanivent**

La chambre coupe-pression de Fontanivent se situe à une altitude de 544m, sur la conduite qui vient depuis la CCP de Bignièrès. Le débit maximum est de plus de 12'000 l/min, la hauteur brute est de 130m et la longueur de la conduite de 2543m avec un diamètre de 300mm sur toute la longueur. Le débit pour demande la demande d'offre était de 190 l/s.

La longueur de la conduite est très importante et son passage en quatre endroits sous les voies d'un train ne facilite pas son remplacement. Là aussi une étude doit être effectuée afin de déplacer le tracé de la conduite. Le relief ainsi que la présence d'habitations ne rend pas son déplacement très facile.

La variante la plus intéressante est celle qui correspond à un diamètre de conduite de 400mm. Le temps de retour brut sur l'investissement est de 6 ans.

Le raccordement électrique se fait directement sur le réseau basse tension et ne nécessite que peu de transformations.

L'énergie maximum disponible pour la CCP de Fontanivent, avec le tracé actuel de la conduite, est de 1.15 GWh<sup>24</sup>.

Le calcul des investissements ainsi que le prix de revient se trouvent sur l'annexe A.11.

#### **4.15.4 Trop-plein du Bouveret**

Il n'existe pas d'ouvrage pour le trop-plein du Bouveret. Le trop-plein s'écoule actuellement dans un canal dénommé le Tovex situé à l'est du Bouveret. Les courbes de débit classés ont été établies sur les années 2001 et 2002. Le débit maximum est de 9500 l/min, la hauteur brute de 136m et la longueur de conduite de 842m. Le débit maximum pour la demande d'offre était de 130 l/s . L'offre reçue s'est basée sur un débit de 190 l/s, donc le prix du kW pour l'électromécanique a été estimé sur la base des trois autres offres.

La conduite actuelle du trop-plein est en mauvais état et nécessite un changement dans un délai relativement proche.

Le SIGE n'est pas propriétaire du terrain où se jette le trop-plein. Un achat de terrain sera nécessaire et la négociation se fera avec la commune de Port-Valais. Le prix de ce terrain, ainsi que le terrassement, ne sont pas inclus dans le calcul du prix de revient du kWh.

Le raccordement électrique se fait directement sur le réseau basse tension.

L'énergie maximum disponible pour le trop-plein du Bouveret est de 4.78 MWh<sup>24</sup>.

Le calcul des investissements ainsi que le prix de revient se trouvent sur l'annexe A.13.

### **4.16 Modifications administratives**

La vente de l'électricité étant une tâche annexe, une modification des statuts du SIGE sera nécessaire [16]. Elle devra avoir l'aval de toutes les communes membres du service.

Une modification du manuel de management sera faite aussi avec l'ajout de cette tâche dans le chapitre du développement durable. [20]

---

<sup>24</sup> Tableau 3 page 36

## 5 Conclusion

L'analyse des différents ouvrages du SIGE démontre que le potentiel, pour l'implantation de mini-centrales hydroélectriques, se situe principalement sur la partie Est du réseau d'eau potable et plus particulièrement sur la conduite de la source des Avants. Les sites les plus intéressants ont fait partie du calcul de pré-dimensionnement de ce diplôme.

Les ouvrages n'ayant pas fait l'objet d'un pré-dimensionnement, comme la chambre de Jor située au-dessus des Avants ou le trop-plein du réservoir de Sassey, nécessitent une étude plus approfondie afin de déterminer leur potentiel réel.

D'un point de vue technique, les conduites existantes comportent de trop grandes pertes de charge. Il sera nécessaire de les remplacer pour obtenir un meilleur rendement et ainsi profiter pleinement du potentiel existant. L'obligation d'un raccordement au réseau électrique de moyenne tension pour les ouvrages de Sollard et Bignièrès augmente fortement l'investissement de la mini-centrale mais ne prêterite pas la possibilité de réalisation du projet, particulièrement pour la chambre coupe-pression de Bignièrès.

Le turbinage de l'eau potable est un apport économique, environnemental et social.

L'apport économique est non négligeable de par les bénéfices engendrés par la vente de l'électricité. Cette apport économique peut être augmenté avec l'obtention d'un label de qualité pour la production d'énergie renouvelable ainsi que par la différenciation entre, les coûts pour la conduite nécessaire au turbinage, et les coûts d'un remplacement pour le maintien de la valeur du réseau d'eau.

L'apport environnemental des mini-centrales hydroélectriques sur l'eau potable, de par la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ainsi que son impact limité sur le paysage et la nature, s'inscrit dans la volonté de développement durable que s'est fixé le SIGE [19].

La possibilité de réaliser, au sein du SIGE, une partie des infrastructures comme : l'électricité, le remplacement des conduites ainsi que l'entretien courant et la révision des parties électromécaniques, contribue à l'apport social du service.

Chernex, le 16 décembre 2006

Cédric Diserens

## 6 Remerciements

Mes remerciements vont à toutes les personnes qui ont collaboré de près ou de loin à ce diplôme et plus particulièrement aux personnes suivantes :

- Monsieur Jean-François Affolter, professeur à la haute école d'ingénierie et de gestion (heig-vd) pour avoir accepté de suivre et soutenir mon diplôme.
- Aux collaborateurs du SIGE qui m'ont fourni les documents et renseignements nécessaires pour la réalisation de ce diplôme, plus particulièrement Mme Hernell et MM Buchs et Gomez.
- Aux lecteurs qui ont consacré de leur temps pour lire ce travail.
- Au SIGE pour m'avoir laissé effectuer cette formation.
- A Stéphanie qui m'a soutenu et supporté tout au long des cinq ans de formation et plus particulièrement pour ces dernières semaines.

## 7 Références

- [1] Statistiques 2005 de consommation d'électricité du SIGE, Romande énergie.
- [2] Énergie dans les réseaux d'eau, guide pour l'optimisation des coûts énergétiques et d'exploitation, OFEN, SSIGE.
- [3] Petites centrales hydro-électriques, La Science appelle les jeunes, Vincent Denis – MhyLab, [www.mhylab.ch](http://www.mhylab.ch).
- [4] I.E. Idel'cik, Mémento des pertes de charge.
- [5] Office fédéral des questions conjoncturelles, PACER, Turbines hydrauliques, 1995.
- [6] Centrales hydrauliques, Jean-François Affolter, heig-vd.
- [7] ESHA, Guide technique pour la réalisation de projets, 2005. [www.esha.be](http://www.esha.be)
- [8] Office fédéral des questions conjoncturelles, PACER, Générateurs et installations électriques, 1995.
- [9] Machines asynchrones, Christophe Besson, heig-vd, 2005.
- [10] Office fédéral des questions conjoncturelles, PACER, Régulation, 1995.
- [11] PDIE, prescriptions des distributeurs d'électricité de suisse romande, installations électriques à basse tension.
- [12] Comment évaluer la faisabilité financière d'une petite centrale hydraulique , Raymond Chenal, MhyLab.
- [13] Évaluation du coût de construction d'une petite centrale hydraulique nouvelle et complète, Raymond Chenal
- [14] Internet, [www.satel.com](http://www.satel.com), systèmes wireless
- [15] Internet, [www.certu.fr/doc/technologies/its/documentations/web/Hydrouti/ch02s05.html](http://www.certu.fr/doc/technologies/its/documentations/web/Hydrouti/ch02s05.html), tableau des coefficients de Strickler
- [16] Me Philippe Vogel, avocat, Lausanne
- [17] Office fédéral de l'énergie, OFEN, [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch) , [www.petitehydraulique.ch](http://www.petitehydraulique.ch)
- [18] Office fédéral des questions conjoncturelles, PACER, le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine, 1995.
- [19] Manuel de management, SIGE, [www.sige.ch](http://www.sige.ch)
- [20] Laurent Buchs, responsable de l'unité qualité et sécurité, SIGE

## 8 Liste des figures

Figure 1 / Réseau d'eau potable du SIGE.....	5
Figure 2 / Consommation d'électricité du SIGE en 2005 .....	6
Figure 3 / Courbe de débits classés de Fontanivent .....	7
Figure 4 / Turbine disposée à l'entrée d'un réservoir.....	8
Figure 5 / Turbinage entre deux zones de pression [2] .....	9
Figure 6 / Périmètre mouillé et surface mouillée.....	12
Figure 7 / Variation des pertes de charge en fonction de l'augmentation du diamètre de la conduite	13
Figure 8 / Coupe d'un injecteur avec déflecteur [7] .....	16
Figure 9 / Pelton à deux jets et paramètres principaux [5] .....	17
Figure 10 / Turbine Crossflow [5] .....	18
Figure 11 / Turbine Francis [5] .....	18
Figure 12 / Turbine Kaplan [5] .....	19
Figure 13 / Pompe inversée [5] .....	19
Figure 14 / Courbes caractéristiques complètes d'une pompe à vitesse de rotation constante [5] .....	20
Figure 15 / Domaine de fonctionnement des turbines [7].....	21
Figure 16 / Débit technique minimum des turbines [7] .....	22
Figure 17 / Schéma d'une machine synchrone [8] .....	22
Figure 18 / Bilan de puissance [8].....	23
Figure 19 / Schéma d'une machine asynchrone [8] .....	25
Figure 20 / Courbe de couple en fonction de la vitesse.[9].....	25
Figure 21 / Caractéristiques d'une machine asynchrone [8].....	26
Figure 22 / Transmission radio point-to-point [14].....	28
Figure 23 / Compensation du facteur de puissance.....	30
Figure 25 / Disposition schématique des ouvrages sur la conduite qui va des Avants à Fontanivent ..	33
Figure 26 / Organigramme du calcul de prix de revient.....	34
Figure 27 / Rendement des conduites de Bignières.....	35
Figure 28 / Intégrale simplifiée .....	36
Figure 29 / Sollard.....	71
Figure 30 / Bignières .....	71
Figure 31 / Fontanivent.....	71

## **9 Liste des Tableaux**

Tableau 1 / Mode de démarrage de la machine synchrone .....	24
Tableau 2 / Mode de démarrage de la génératrice asynchrone .....	27
Tableau 3 / Énergie disponible.....	36
Tableau 4 / Résumé des variantes présentant le meilleur prix de revient et bénéfice .....	39

## 10 Liste des annexes

Annexe [A.1]	Profil en long de la conduite des Avants.	p. 47
Annexe [A.2]	Tableaux sites potentiels (1).	p. 48
Annexe [A.3]	Tableaux sites potentiels (2).	P. 49
Annexe [A.4]	Tableau des longueurs de conduite.	p. 50
Annexe [A.5]	Tableaux calcul pertes de charge de Bignières.	p. 51
Annexe [A.6]	Énergie disponible avec une conduite de 400mm / Bignières	p. 52
Annexe [A.7]	Tableau prix de revient Bignières.	p. 53
Annexe [A.8]	Graphique prix de revient Bignières	p. 54
Annexe [A.9]	Tableau prix de revient Sollard.	p. 55
Annexe [A.10]	Graphique prix de revient Sollard.	p. 56
Annexe [A.11]	Tableau prix de revient Fontanivent.	p. 57
Annexe [A.12]	Graphique prix de revient Fontanivent.	p. 58
Annexe [A.13]	Tableau prix de revient Bouveret.	p. 59
Annexe [A.14]	Graphique prix de revient Bouveret.	p. 60
Annexe [A.15]	Demande d'approbation de projet ESTI.	p. 61
Annexe [A.16]	Demande de raccordement pour mise en parallèle sur réseau électrique.	p. 62
Annexe [A.17]	PDIE, Schémas de raccordement d'une installation auto-productrice avec mise en parallèle sur le réseau.	p. 63
Annexe [A.18]	Tarifs de rachat électricité Romande énergie, région Vevey-Montreux.	p. 64
Annexe [A.19]	Tarifs de rachat électricité Romande énergie, région du Bas –Valais.	p. 65
Annexe [A.20]	Tarifs des vannes Clayton.	p. 66
Annexe [A.21]	Certification Naturemade.	p. 67
Annexe [A.22]	Offres Ofatec	p. 68
Annexe [A.23]	Offres Romande Énergie	p. 69
Annexe [A.24]	Schéma descriptif d'une mini-centrale hydroélectrique sur l'eau potable	p. 70
Annexe [A.25]	Photos des sites de Sollard, Bignières et Fontanivent	p. 71