



# RÉHABILITATION DE LA PETITE CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE DE LA FOULAZ SUR L'ORBE À VALLORBE

## ETUDE D'AVANT PROJET

### Rapport final

#### Auteurs

##### **La Foulaz Energies SA**

MM. Raymond Chenal et Vincent Denis

Case postale 50, 1337 Vallorbe, [raymond.chenal@bluewin.ch](mailto:raymond.chenal@bluewin.ch); [vincent.denis@a3.epfl.ch](mailto:vincent.denis@a3.epfl.ch)

##### **RWB Eau et Environnement SA**

M. Olivier Chuat

Rue de l'Epervier 4, 2053 Cernier, [ochuat@rwb.ch](mailto:ochuat@rwb.ch)



Date: 19.08.09

**Soutenu par l'Office fédéral de l'énergie OFEN**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Adresse postale: CH-3003 Berne

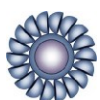
Tél. +41 31 322 56 11, fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Responsable OFEN: bruno.guggisberg@bfe.admin.ch

Numéro de projet: 102416

**Le ou la mandataire de l'étude est seul(e) responsable de son contenu.**



## Table des matières

Résumé .....	5
Introduction .....	6
Historique .....	6
Cadre du projet .....	7
Situation actuelle et projet de réhabilitation.....	7
Situation actuelle.....	7
Projet de réhabilitation .....	9
Dénivellation et hydrologie .....	9
Données à disposition .....	9
Hydrologie et débit d'équipement .....	10
Variation des débits, débit d'étiage et débit de crue .....	10
Dénivellation exploitable .....	10
Débits réservés .....	10
Débits turbinables .....	10
Description des équipements et infrastructures .....	10
Choix du type et du nombre de machines .....	10
Type de groupes hydroélectriques.....	10
Nombre de groupes .....	10
Principe de régulation et gestion des crues.....	10
Dimensionnement de la passe à poissons .....	10
Définition des ouvrages et travaux .....	10
Travaux préparatoires.....	10
Démolitions .....	10
Terrassements .....	10
Béton armé .....	10
Equipements hydrauliques et vantellerie .....	10
Grilles et dégrilleur .....	10
Vanne clapet .....	10
Vannes planes existantes .....	10
Définition des équipements hydro- et électromécaniques.....	10
Rappel des caractéristiques de l'aménagement.....	10
Turbine .....	10
Mise en place, montage et démontage des turbogroupes.....	10
Génératrice .....	10
Contrôle-commande.....	10
Dispositif de sécurité .....	10
Raccordement électrique .....	10



Avantages de la solution proposée relativement à la situation actuelle.....	10
Calculs de production .....	10
Puissance hydraulique.....	10
Rendements.....	10
Production électrique annuelle .....	10
Analyse économique .....	10
Investissements .....	10
Investissements génie civil .....	10
Investissements en électromécanique.....	10
Total des investissements.....	10
Chiffre d'affaire annuel.....	10
Frais d'exploitation .....	10
Frais financiers.....	10
Calcul du prix de revient du kWh .....	10
Marge d'exploitation.....	10
Conclusions .....	10
Annexes.....	10



## Résumé

Situé sur l'Orbe, sur le territoire de la commune de Vallorbe, le site de la Foulaz est exploité pour la force hydraulique depuis près de quatre siècles. La petite centrale actuelle, bien qu'au bénéfice d'un droit d'eau distinct et permanent de  $4.2 \text{ m}^3/\text{s}$  inscrit au cadastre, est cependant à l'abandon depuis les années 1970.

Propriétaire du site et du droit d'eau depuis juin 2008, La Foulaz Energies SA prévoit la réhabilitation du site et l'abandon du droit d'eau existant contre une concession de durée raisonnable pour un débit plus élevé.

L'analyse hydrologique, basée sur des mesures régulières, la rivière étant surveillée aussi bien par la Confédération que par la société Romande Energie SA exploitant la centrale de La Dernier en amont.

L'analyse de la courbe des débits classés conduit à choisir un débit d'équipement de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Avec une chute disponible pour le turbinage variant entre 1.46 et 3.00 m en fonction du débit dans l'Orbe, la production annuelle moyenne possible serait ainsi de 708'000 kWh/an, la puissance électrique maximale étant de 164 kW.

Le prix de revient calculé sur une durée d'amortissement de 25 ans est de 24.99 cts/kWh. Compte tenu de la double imposition par la TVA de la RPC, ce prix de revient permet tout juste l'équilibre des comptes. Le prix de revient baisse cependant à 22 cts/kWh si l'on considère un amortissement différencié pour chaque catégorie d'investissement.



## Introduction

### HISTORIQUE

La première utilisation de la force hydraulique à La Foulaz, exploitant une dénivellation naturelle au moyen d'une roue hydraulique, date de 1657 pour une forge de clouterie. Cette forge a été désaffectée et transformée en tannerie en 1768. En 1835 la tannerie fait place à un battoir et à une scierie, puis dès 1841 à une fabrique de rasoirs. En 1883, la scierie est conservée, mais les rasoirs sont remplacés par des limes. En 1893, le site de La Foulaz subit d'importantes transformations. Les bâtiments actuels datent de cette époque. La roue hydraulique est remplacée par des turbines, mais leur exploitation subit tellement de déboires qu'elles sont abandonnées; l'ancienne roue hydraulique est remise en service, puis, les besoins de puissance mécanique augmentant, de nouvelles turbines sont installées en 1895.



Figure 1. L'Usine de la Foulaz en 1902...



Figure 2. ...et en 1950

L'activité de La Foulaz se développe fortement : limes et burins d'horlogerie, rifloirs, grattoirs, etc. Toutefois, cette fabrication est progressivement transférée à la fabrique du Moutier, qui prend en 1899 le nom de UMV (Usines Métallurgiques de Vallorbe). En 1911, il ne reste plus à La Foulaz que quelques ateliers pour les aiguiseurs.

Cependant, dès 1916, la fabrique La Foulaz connaît une nouvelle et importante activité vouée à l'horlogerie : boîtiers de montres, pierres d'horlogerie, etc. Une nouvelle turbine est installée vers 1920. Elle entraînait des systèmes d'arbres et de poulies à courroies qui actionnaient les machines de la fabrique en produisant de la force mécanique et de l'électricité destinée essentiellement à l'éclairage. Cette industrie est abandonnée en 1970. Les bâtiments sont alors transformés en appartements et en ateliers artisanaux.

En 1997, deux habitants de Vallorbe, un électro-mécanicien de Dizy et deux ingénieurs de MHyLab (Laboratoire de mini-hydraulique de Montcherand) projettent de réhabiliter une des turbines abandonnées pour produire de l'électricité. Les conditions cadre d'alors n'offrant pas de garanties suffisantes et la puissance du groupe hydroélectriques étant très faible (environ 20 kW), le projet est toutefois abandonné.

Suite aux changements importants intervenus dans la loi sur l'Energie (LEne) consécutivement à l'adoption de la Loi fédérale sur l'approvisionnement en électricité (LApEI), les conditions cadre en faveur des énergies renouvelables fixées par l'Ordonnance sur l'Energie (OEne) du 14 mars 2008, se sont fortement améliorées non seulement en termes de tarifs, mais également en termes de garanties financières.

Cet environnement favorable a poussé les acteurs de la première tentative de réhabilitation, auxquels s'est joint un autre habitant de Vallorbe, de relancer le projet courant 2007 en créant la société La Foulaz Energies SA dans le but de reconstruire une petite centrale hydroélectrique sur le site, tout en mettant en valeur le patrimoine construit. A cette fin, La Foulaz Energies SA a acquis les immeubles et le droit d'eau permanent qui leur est lié le 25 juin 2008.





## CADRE DU PROJET

Le présent projet bénéficie du soutien du programme Suisse Energie, volet Petites centrales hydrauliques, ainsi que du soutien du Service de l'Energie du Canton de Vaud. Il s'inscrit, d'une part, dans le cadre de la politique fédérale en matière de développement des énergies renouvelables et, d'autre part, dans le cadre du programme BoisEau lancé par le Canton de Vaud.

Les travaux de conception générale de l'installation et de dimensionnement des équipements hydro- et électromécaniques ont été réalisés par la Foulaz Energie SA qui dispose des ressources internes nécessaires en termes d'ingénierie. Les prestations d'ingénieurs civil ont quant à elles été réalisées par le bureau RWB SA à Cernier et Yverdon-les-Bains.

## Situation actuelle et projet de réhabilitation

### SITUATION ACTUELLE

La Foulaz Energie SA est propriétaire de la parcelle 555 sur la Commune de Vallorbe ainsi que du droit d'eau distinct et permanent inscrit au registre foncier comme servitude N° 145'184 – ID.2003/1059. Ce droit d'eau est par ailleurs inscrit au Service des Eaux Sols et Assainissement (SESA) du canton de Vaud sous le numéro 509/277. Ce droit s'étend du point 519.070/174.040 au point 519.070/174.080 pour un débit maximal de 4.2 m<sup>3</sup>/s.



Figure 3. Plan de situation du site de la Foulaz



Actuellement, le site présente les éléments suivants (depuis la rive gauche jusqu'à la rive droite) :

- une vanne plane motorisée gardant l'entrée du canal dit de la STEP. Cette vanne est actuellement contrôlée par la STEP,
- un îlot de verdure,
- une seconde vanne plane motorisée, également contrôlée par la STEP, donnant directement dans le lit de la rivière,
- un seuil,
- un canal d'amenée aux turbines, gardé par des vannes planes manuelles en très mauvais état. Ledit canal longe le bâtiment pour arriver à l'emplacement des anciennes turbines, lesquelles restituaient l'eau à l'Orbe latéralement pour les deux premières et via un canal souterrain pour la troisième.



*Figure 4. Vue de l'amont des deux vannes motorisées, de l'îlot de verdure, du seuil et de la passerelle*



*Figure 5. Vue de l'amont des vannes d'entrée du canal de la centrale*







Figure 6. Vue de l'amont du canal et de la centrale



Figure 7. Vue latérale du canal de la centrale

## PROJET DE RÉHABILITATION

Le projet actuel prévoit de conserver intacts les deux vannes motorisées existantes, l'îlot et le canal de la STEP. Il est par contre prévu de démolir le barrage et le canal actuels en les remplaçant par :

- un barrage équipé d'une vanne clapet,
- une échelle à poissons (dispositif inexistant à l'heure actuelle),
- un nouveau canal latéral plus large pour y installer des turbines de type siphon.

Comme on le verra par ailleurs dans la suite du rapport, le projet prévoit de négocier l'abandon du droit d'eau perpétuel contre une concession de durée suffisante pour un débit de  $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Le détail des travaux est donné dans les paragraphes 0 à 0.

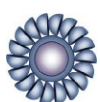
## Dénivellation et hydrologie

### DONNÉES À DISPOSITION

Les débits de l'Orbe sont mesurés par l'Office fédéral de l'environnement depuis de nombreuses années à l'entrée du lac de Joux et à Orbe au lieu dit Le Chalet. Ces données ne sont malheureusement pas exploitables pour connaître le débit à Vallorbe et plus particulièrement à La Foulaz, l'Orbe étant influencée en amont par la retenue naturelle que constitue le Lac de Joux et en aval par la Jougnenaz, affluent d'importance. Il n'est donc pas possible de procéder par simple rapport des surfaces des bassins versants.

Fort heureusement, les débits de l'Orbe sont mesurés heure par heure par Romande Energie SA à la sortie de la Centrale de La Dernier, située environ 3 km en amont du site de la Foulaz. L'Orbe ne recevant pas d'apports significatifs entre La Dernier et La Foulaz, nous pouvons par conséquent valablement considérer cette source de données comme directement utilisable pour notre étude.

Les mesures communiquées couvrent la période 1997 - 2007. Ils comprennent les débits de la source de l'Orbe, de la Gerlette et de ceux de la Centrale de La Dernier.



## HYDROLOGIE ET DÉBIT D'ÉQUIPEMENT

Sur la base des mesures disponibles, il est possible de tracer la courbe des débits classés moyens horaires de l'Orbe à La Foulaz, laquelle est présentée dans la Figure 8.

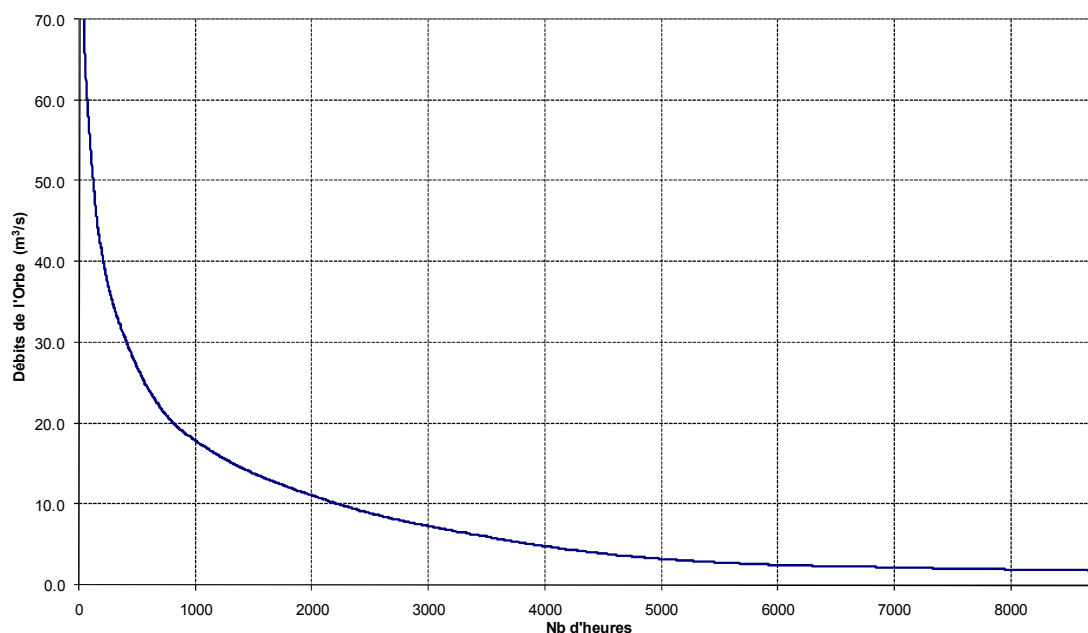


Figure 8. Courbe des débits classés de l'Orbe à la Foulaz – Moyennes horaires sur la période 1998-2007

On observe immédiatement la grande variabilité des débits, variabilité qui, comme on le verra plus loin, est fortement accentuée par les importants débits promptement et aléatoirement lâchés par la Centrale de La Dernier.

Diverses simulations prenant en compte la productivité, la taille, la nature et le coût des équipements conduisent finalement à proposer un **débit de concession de 10.0 m³/s**.

## VARIATION DES DÉBITS, DÉBIT D'ÉTIAGE ET DÉBIT DE CRUE

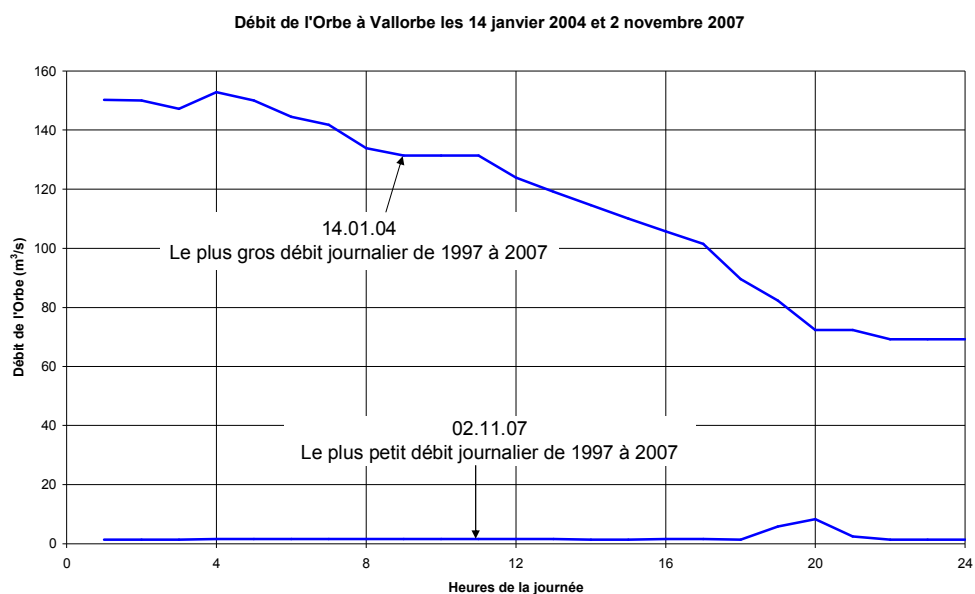
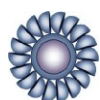


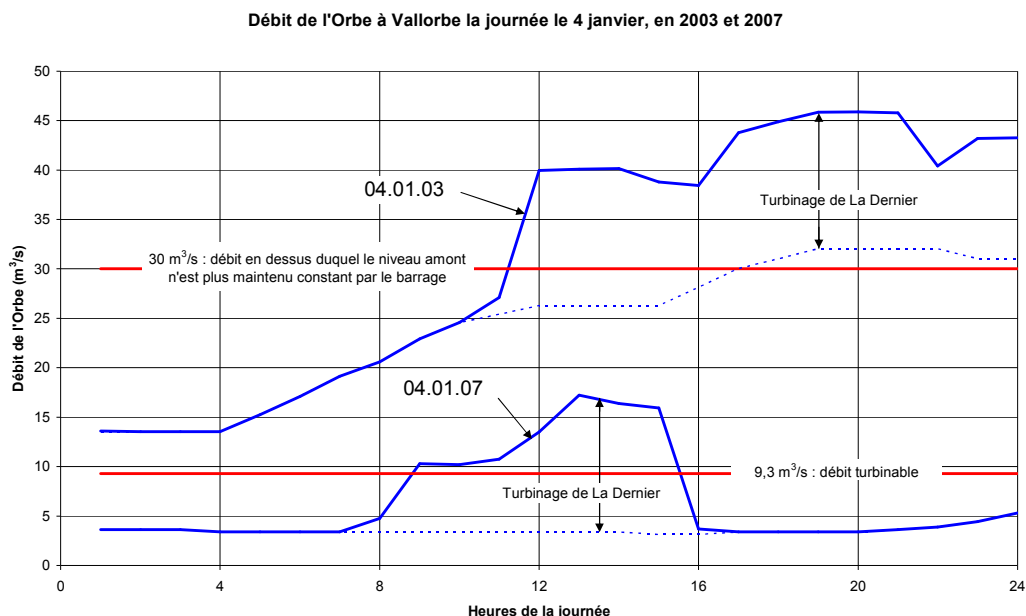
Figure 9. Débits horaires de l'Orbe à la Foulaz les 14 janvier 2004 et 2 novembre 2007



Le dépouillement des milliers de points relevés par Romande Energie de 1996 à 2007, montre que le débit **maximal** de l'Orbe a atteint **152,8 m<sup>3</sup>/s** le 14 janvier 2004, entre 03h00 et 04h00.

Quant au débit **minimal** durant cette période, il a été relevé en 2007 à **1,4 m<sup>3</sup>/s** entre 21h00 le 1<sup>er</sup> novembre et 03h00 le 2 novembre.

La Figure 10 illustre par ailleurs les effets très importants de la Centrale de La Dernier sur le régime de l'Orbe.



*Figure 10. Débits horaires de l'Orbe à la Foulaz les 4 janvier 2003 et 2007*

L'ensemble de ces observations conduisent à retenir un débit de 170 m<sup>3</sup>/s comme débit de crue de dimensionnement pour les infrastructures.

## DÉNIVELLATION EXPLOITABLE

La dénivellation est définie comme la différence de niveau entre le plan d'eau amont et le plan d'eau aval.

Le choix du niveau amont résulte de trois exigences :

1. Il doit être le plus élevé possible pour des raisons évidentes de production électrique. Une élévation de seulement 1 cm du niveau d'eau amont représente un gain de production d'environ 3'000 kWh/an.
2. Il doit être le plus constant possible afin de limiter le marnage de la rivière. En fixant sa cote maximale à une altitude de 745,69 m, jusqu'au débit de 46 m<sup>3</sup>/s environ, le nouveau barrage améliore notablement la situation actuelle. En effet, cette cote est actuellement fréquemment dépassée lorsque l'Orbe est moyennement haute et que La Dernier débite. La photo ci-dessous illustre cette situation entre le Musée du fer et La Foulaz.
3. Le fonctionnement des roues hydrauliques du Musée du fer doit être garanti. Autrement dit, lorsque le musée est en activité, le niveau à l'aval des roues ne doit pas dépasser la cote de 745,64 m, d'entente avec le personnel de la forge, quelque soit le débit de l'Orbe jusqu'à 46 m<sup>3</sup>/s.





Figure 11. Vue de l'Orbe en amont immédiat du site de la Foulaz en période de hautes eaux

Le niveau **aval** dépend uniquement du régime de la rivière à l'aval de La Foulaz. Plusieurs mesures ont été faites en corrélation avec le débit de l'Orbe mesuré par Romande Energie SA à La Dernier.

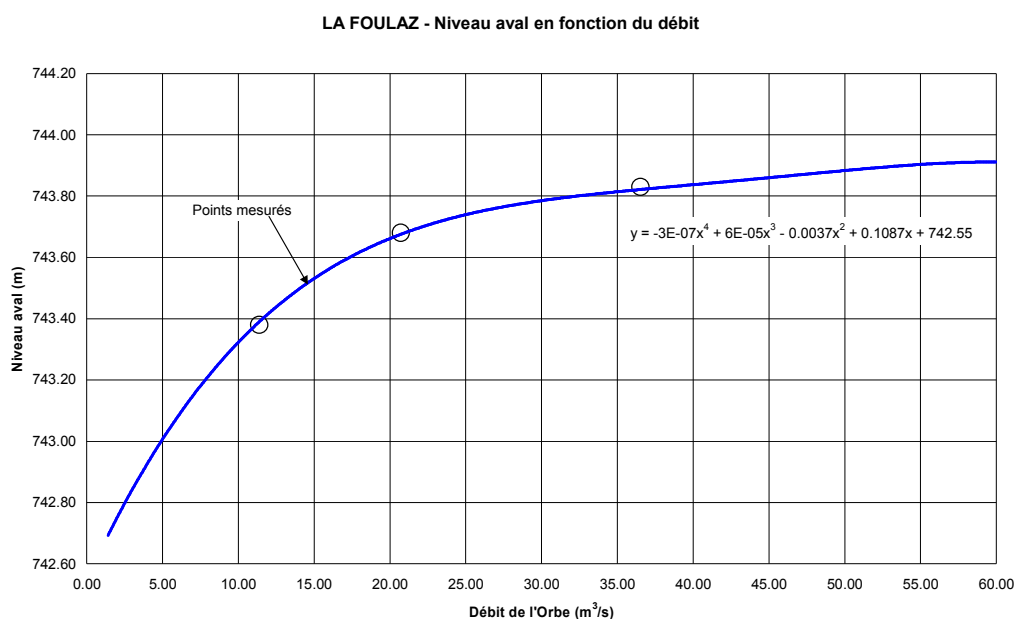


Figure 12. Niveau aval à la Foulaz en fonction des débits dans l'Orbe

Ainsi, pour un débit de l'Orbe inférieur ou égal à 46 m³/s, la dénivellation exploitable variera de 3.00 m (débit dans l'Orbe de 1.4 m³/s et niveau amont à 745.69 m) à 1.46 m (débit dans l'Orbe de 46 m³/s et niveau amont fixé par la nécessité de maintenir un niveau à l'altitude 745.64 m au Musée du fer).

## DÉBITS RÉSERVÉS

De par la faible pente de l'Orbe dans le secteur de la Foulaz, le site présente la particularité de pouvoir être exploité sans qu'il n'y ait de dérivation conduisant à l'assèchement partiel d'un secteur de la rivière. En effet, la faible « longueur » du site garantit que l'aval du barrage sera toujours en eau.

Le site actuel ne possède pas d'échelle à poissons, ce qui est contraire à la Loi sur la protection des eaux. Le nouveau projet prévoit par conséquent la réalisation d'un tel dispositif de franchissement.



Les discussions avec le SESA (M. Davoli) ont permis de fixer les critères de dimensionnement de la passe à poisson, lesquels sont explicités dans le chapitre 0 décrivant les travaux à réaliser, ainsi que son débit fixé à **120 l/s**. Celui-ci sera garanti par une vanne plane automatique à réglage "par-dessus" permettant de maintenir une section d'entrée constante.

Par ailleurs, un débit minimal doit être garanti en tout temps dans le canal de la STEP. Il ne doit cependant pas être trop élevé, ceci pour éviter que les poissons ne soient attirés à l'embouchure du canal. Les différentes observations et essais faits in situ permettent de fixer ce débit à **80 l/s**, considéré comme maximal. Il sera garanti par l'aménagement d'un orifice calibré dans la vanne.

Le débit réservé total est donc arrêté à **200 l/s ou 0.2 m³/s**.

## DÉBITS TURBINABLES

La courbe des débits turbinables présentée dans la Figure 13 résulte de trois relations :

- Courbe des débits classés moyens journaliers de l'Orbe à La Foulaz à laquelle on soustrait le débit réservé (0,200 m³/s), limitée au débit économiquement turbinable requis, soit 10.0 m³/s. Ce débit est disponible, en moyenne, 91 jours par an.
- Courbe de la variation du débit turbiné par diminution de la dénivellation lorsque le niveau aval remonte fortement en fonction du débit de la rivière
- Limite de fonctionnement des turbines quand la dénivellation atteint la valeur minimale de 1,0 m.

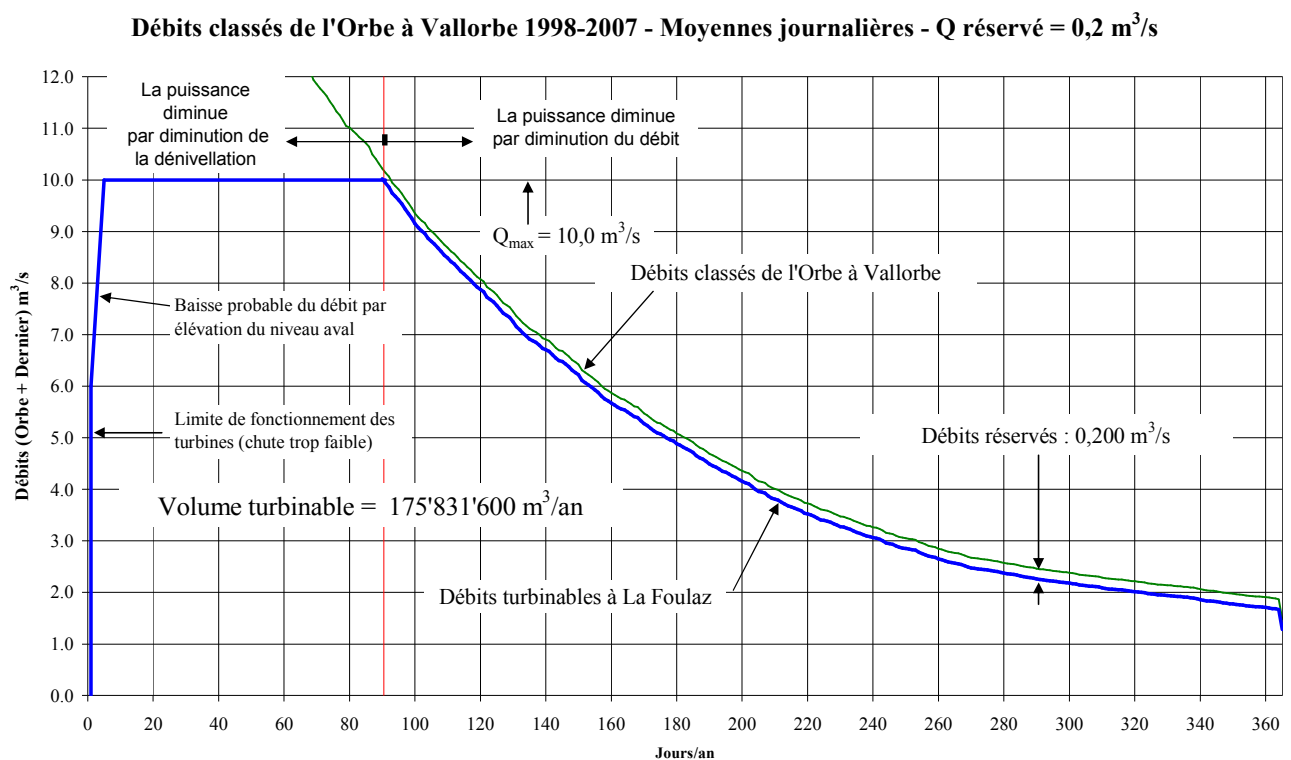


Figure 13. Débits moyens journaliers de l'Orbe turbinables à la Foulaz

L'intégration du domaine limité par ces trois relations exprime de volume moyen turbinable annuellement, soit :

$$V = 175'831'600$$

$$[\text{m}^3/\text{an}]$$





## Description des équipements et infrastructures

### CHOIX DU TYPE ET DU NOMBRE DE MACHINES

#### Type de groupes hydroélectriques

Vu la dénivellation inférieure à 3 m et la variation des débits, le choix de groupes hydroélectriques avec turbines axiales en siphon à distributeur fixe et à pales de la roue motrice réglables s'impose. Celles-ci seront construites selon les travaux de développement déjà réalisés par le laboratoire de mini-hydraulique de Montcherand (MHyLab).

La technique ainsi développée a conduit à la réalisation d'une gamme de produits « standards » répondant aux besoins de sites à très basse chute, tout en gardant une parfaite adaptabilité aux caractéristiques locales.

Le dimensionnement des turbines résulte d'un processus itératif qui prend en compte les critères suivants:

- la distribution du rendement en fonction du débit d'équipement, et notamment le débit qui correspond au rendement maximal, en vue de maximiser la production électrique annuelle,
- la taille de la turbine:
  - son diamètre de roue, qui doit être minimal afin de limiter les coûts,
  - son encombrement hors tout, lié également au diamètre de roue, afin de limiter l'excavation pour son intégration au site,
- la vitesse de rotation, que l'on cherchera maximale afin de limiter la taille du groupe turboélectrique,
- le comportement en cavitation, qui, pour les turbines à 4 pales MHyLab avec une telle chute, ne pose aucun problème.

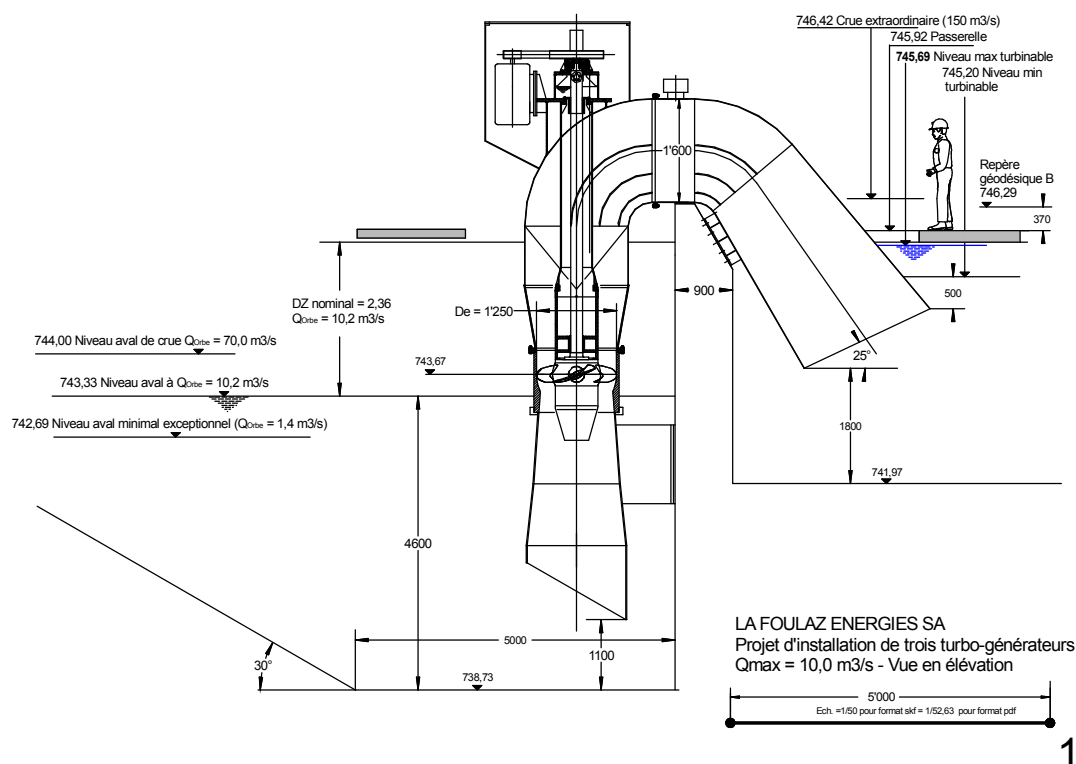


Figure 14. Vue en coupe des groupes Siphon prévus pour la Foulaz



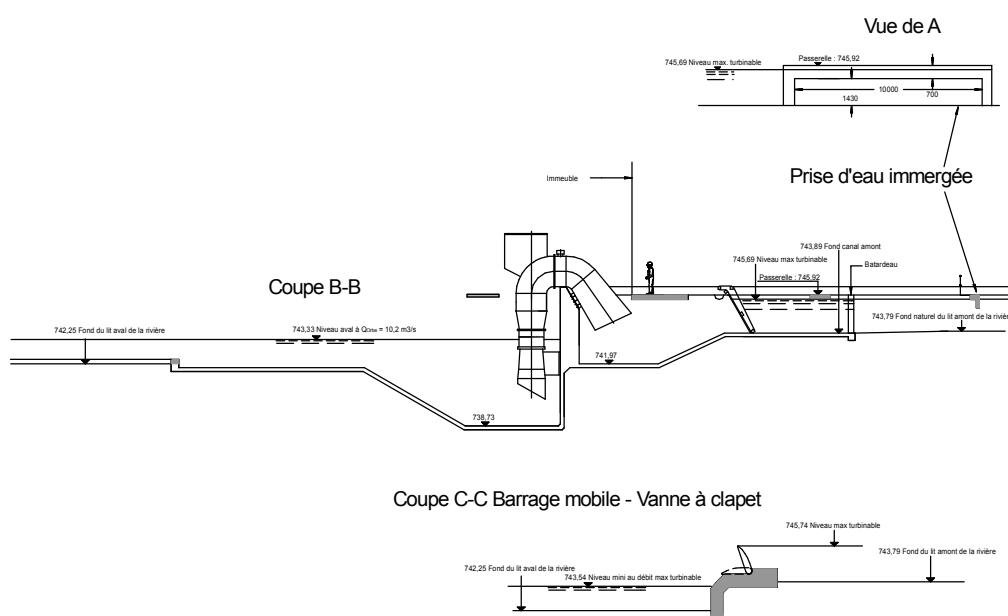
## Nombre de groupes

Le choix du nombre de groupes résulte également d'un processus itératif prenant en compte le débit maximum possible, mais également la variation des débits et la flexibilité des machines hydrauliques. Il convient en effet de trouver la solution permettant de maximiser la production tout en limitant la taille des machines et par là même leur coûts.

L'ensemble de ces critères, auquel il faut ajouter l'intérêt d'utiliser une machine standard de la gamme siphon MHyLab pour pouvoir bénéficier d'un effet série, conduisent à choisir d'installer trois groupes identiques d'une capacité maximale de  $3.33 \text{ m}^3/\text{s}$  chacun.

## PRINCIPE DE RÉGULATION ET GESTION DES CRUES

Les figures ci-dessous présentent de manière synthétique l'aménagement projeté et permettent d'avoir une bonne compréhension du dispositif de réglage de niveau et de gestion des crues.



LA FOULAZ ENERGIES SA - Projet d'installation de trois turbo-générateurs - Détails - Ech. 1/200 (format A4)

Figure 15. Projet de petite centrale hydroélectrique de la Foulaz, vue en coupe

Le projet prévoit la démolition du canal existant en rive droite ainsi que du barrage actuel entre le canal et la vanne No 2, puis leur remplacement par un canal de plus grande largeur et par un barrage à vanne clapet. Les ouvrages situés entre la vanne No 2 et la rive gauche ne subissent pas de modifications relativement à l'état actuel.

La référence des niveaux est donnée par le repère géodésique, appelé repère B, scellé sur un des piliers de la passerelle existante. Son altitude est de 746,29 m. Tous les niveaux, y compris au Musée du fer, ont été référenciés au repère B, ceci au moyen d'un théodolite à rayon laser.

Cette manière de faire permet de mesurer aisément la dénivellation de la rivière entre le barrage du Musée du Fer et le barrage de la Foulaz, distants de 415 m, ceci en fonction du débit de l'Orbe (communiqué par Romande Energie SA). Le graphique de la Figure 17 illustre cette variation en fonction de trois mesures réalisées à trois débits différents.

Durant l'activité du Musée du fer, la consigne de niveau prise en compte par le système de contrôle-commande de l'aménagement est donnée au moyen d'une sonde située sur la rivière, à la hauteur du canal de fuite des roues hydrauliques. La valeur de consigne correspond en ce cas à l'altitude 745.64 m au Musée (correspondant à une altitude du plan d'eau à l'amont de la Foulaz comprise entre 745.59 et 745.32 pour un débit dans l'Orbe compris entre  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $46 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Lorsque le Musée est fermé (la nuit et durant 5 mois d'hiver), la consigne est donnée au moyen d'une sonde placée à l'amont du barrage de La Foulaz, l'altitude de référence du plan d'eau étant à 745,69 m.



Cette manière de faire permet de respecter les exigences mentionnées dans le paragraphe 0.

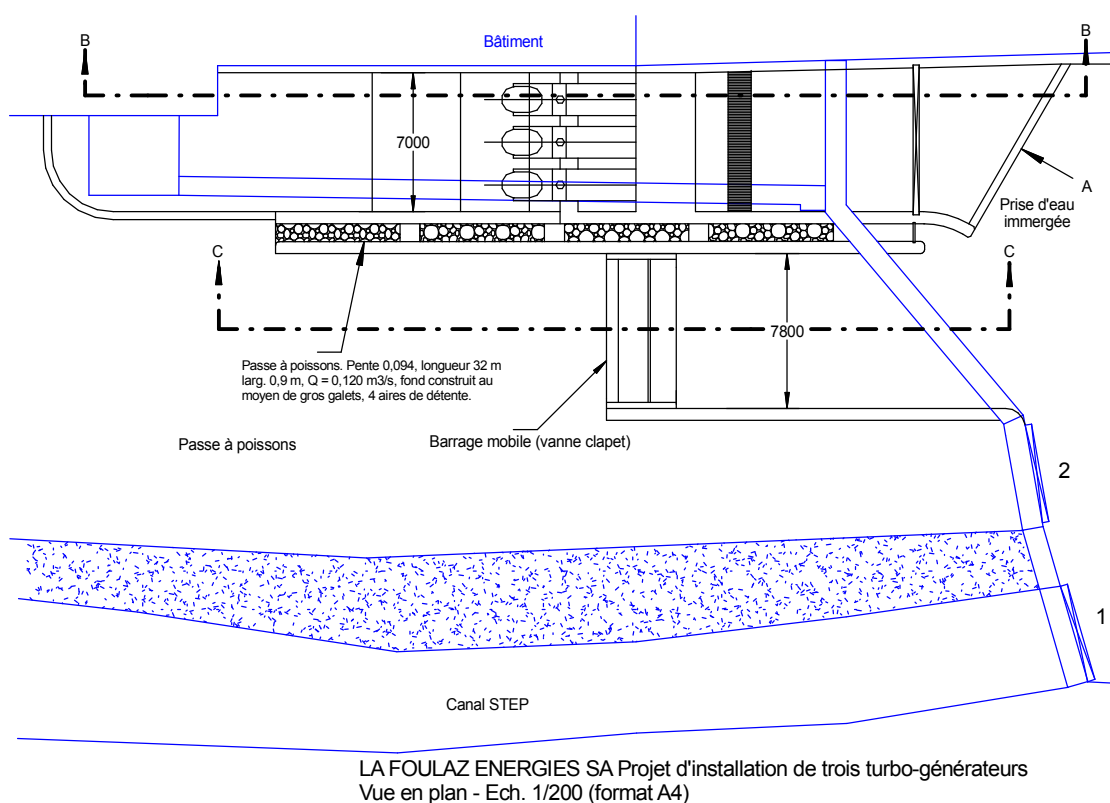


Figure 16. Projet de petite centrale hydroélectrique de la Foulaz, vue en plan.

LA FOULAZ - Dénivellation de la rivière entre le Musée du fer et La FOULAZ en fonction du débit

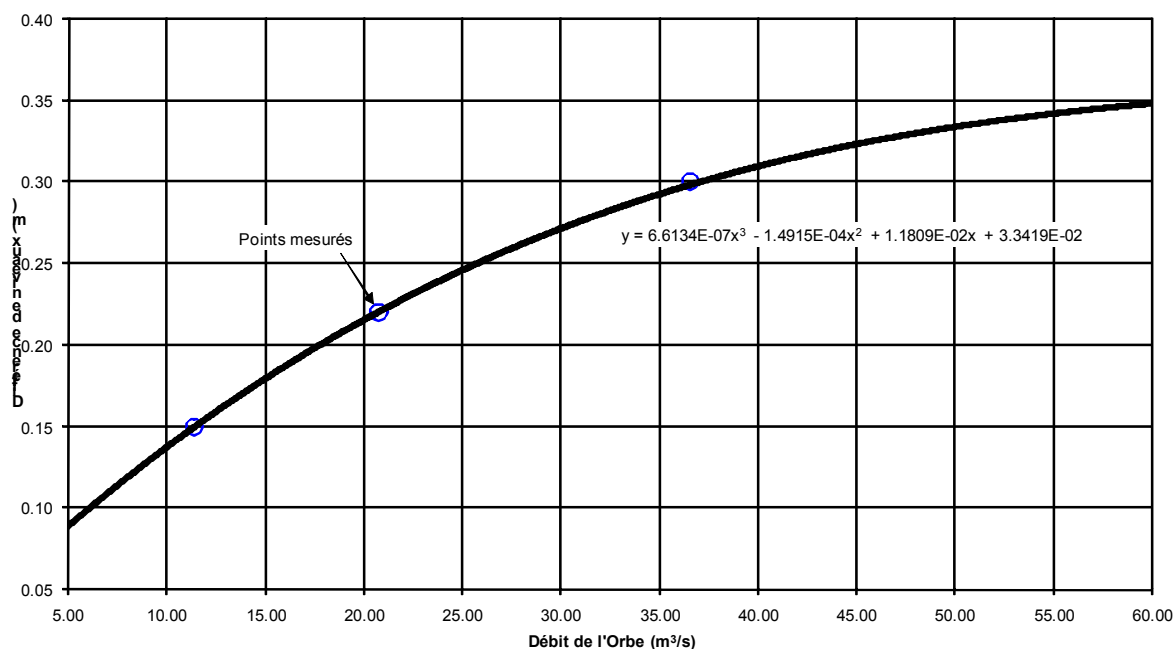


Figure 17. Différence de niveau entre le musée du fer et la Foulaz en fonction du débit de l'Orbe.



Le dispositif de réglage du niveau amont comprend :

- les trois turbines, pour une gamme de débits compris entre 0,5 et 10,0 m<sup>3</sup>/s,
- le barrage mobile (vanne à clapet), pour une gamme de débits compris entre 0 et 12 m<sup>3</sup>/s,
- la vanne plane télécommandée N° 1 (vanne existante du canal de la STEP), pour une gamme de débits compris entre 0 et 12 m<sup>3</sup>/s,
- la vanne plane télécommandée N° 2, (vanne existante), pour une gamme de débits compris entre 0 et 12 m<sup>3</sup>/s.

La capacité totale de réglage est donc de 46 m<sup>3</sup>/s, contre 24 m<sup>3</sup>/s aujourd'hui.

La procédure de réglage s'établit comme suit, en suivant une augmentation continue du débit :

- 1) Le débit de l'Orbe à la Foulaz est inférieur ou égal à 10,2 m<sup>3</sup>/s.  
Le débit se répartit entre celui des turbines (max. 10,0 m<sup>3</sup>/s), celui de la passe à poissons (0,120 m<sup>3</sup>/s) et celui du canal de la STEP au moyen d'un orifice calibré à 0,080 m<sup>3</sup>/s. Le système de contrôle-commande maintient le niveau amont constant en manœuvrant les pales de la roue motrice des turbines. Une baisse de niveau donne un ordre de fermeture, tandis qu'une hausse donne un ordre d'ouverture.
- 2) Le débit de l'Orbe à la Foulaz est supérieur à 10,2 m<sup>3</sup>/s.  
Les turbines fonctionnent à pleine ouverture et le réglage de niveau est commuté sur la vanne-clapet du barrage. Lorsque l'abaissement de celle-ci atteint une valeur prédéterminée, la vanne N° 1 s'ouvre d'une quantité telle que son débit est un peu inférieur au débit précédent de la vanne-clapet. Lorsque la vanne-clapet atteint à nouveau la position précédente, elle commande une deuxième ouverture de la vanne N° 1. Quand celle-ci est complètement ouverte, le réglage s'opère de la même manière avec la vanne N° 2. Les deux vannes planes étant complètement ouvertes, c'est la vanne-clapet seule qui règle le niveau jusqu'à son ouverture complète. Au-delà de 46 m<sup>3</sup>/s environ, ce qui se produit en moyenne 5 jours par an, le niveau de la rivière s'élève au-dessus de la cote 745,69 à la Foulaz.

Précisons que la capacité du dispositif d'évacuation de crue projeté est supérieure à l'installation actuelle qui comporte un barrage fixe. Elle diminuera, par conséquent, les risques d'inondation au Musée du fer.

## **DIMENSIONNEMENT DE LA PASSE À POISSONS**

Le dimensionnement de la passe à poissons résulte des recommandations de M. Jean-Claude Davoli du SESA. Les critères considérés sont ainsi les suivants :

- Pente autant que possible inférieure à 10 %,
- Vitesse de l'eau comprise entre 1,0 et 1,5 m/s (en dessous de 1,0 m/s, l'appel est insuffisant et au-delà de 1,5 m/s, les poissons se fatiguent),
- Création de plusieurs plages de repos sur la longueur de la passe,
- Réalisation du fond en gros cailloux de rivière de manière à obtenir un coefficient de Strickler situé entre 15 et 20.

Sur ces bases, la passe à poissons est dimensionnée comme suit :

Longueur maximale L

Celle-ci est fixée à 32 m.

Dénivellation maximale  $\Delta Z_{\max}$

La dénivellation maximale est atteinte lorsque le débit de l'Orbe est minimal, soit 1,4 m<sup>3</sup>/s, situation par ailleurs extrêmement rare. Ce débit se répartit entre celui d'une seule turbine en service (1,2 m<sup>3</sup>/s) et le débit réservé (0,2 m<sup>3</sup>/s). Dans ce cas, le niveau aval descend à la cote 742,69 m. Le niveau amont restant inchangé à la cote 745,69, la dénivellation maximale est donc :

$$\Delta Z_{\max} = 745,69 - 742,69 = 3,00 \quad [\text{m}]$$



En ce cas, la pente de la passe est donnée par :

$$J = \frac{\Delta Z_{\max}}{L} = \frac{3,00}{32} = 0,0938 \quad [-]$$

En admettant :

- une largeur  $b = 0,6$  [m]
- une vitesse de l'eau  $v = 1,2$  [m/s]
- un débit  $Q = 0,120$  [m<sup>3</sup>/s]

La hauteur de la section débitante est donnée par :

$$h = \frac{Q}{v \cdot b} = \frac{0,120}{1,2 \cdot 0,6} = 0,167 \quad [\text{m}]$$

Le coefficient de Strickler est quand à lui donné par :

$$k = \frac{v}{R_H^{2/3} \cdot J^{1/2}} \quad [\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1/2}]$$

avec :  $R_H = \text{rayon hydraulique} = \frac{S}{\Pi} \quad [\text{m}]$

où  $S = \text{surface débitante} = b \cdot h = 0,60 \cdot 0,167 = 0,100 \quad [\text{m}^2]$

et  $\Pi = \text{périmètre mouillé} = b + 2 \cdot h = 0,6 + 2 \cdot 0,167 = 0,934 \quad [\text{m}]$

d'où  $R_H = \frac{0,100}{0,934} = 0,107 \quad [\text{m}]$

donc  $k = \frac{1,2}{0,107^{2/3} \cdot 0,0938^{1/2}} = 17,4 \quad [\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1/2}]$

Le coefficient ainsi déterminé correspond donc bien à un fond construit en gros cailloux de rivière, ce qui est le but recherché.

La passe comportera quatre aires de détentes réparties sur sa longueur. Elle sera disposée le long des canaux d'amenée et de fuite de la centrale, ce qui est favorable au niveau du débit d'attrait.

En fonction du débit de la rivière et en raison de la nécessité de ne pas dépasser le niveau 745,64 au Musée du fer, le niveau amont à La Foulaz est appelé à varier jusqu'à 0,38 m (crues). Une vanne plane à réglage "par-dessus" garantit automatiquement une section d'entrée constante de la passe à poissons.

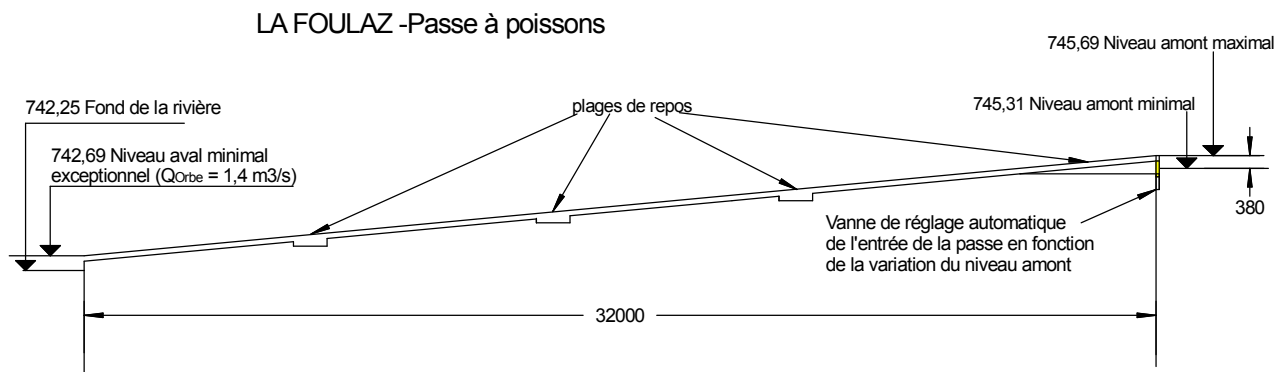


Figure 18. Schéma de principe de la passe à poisson vue en coupe.





## DÉFINITION DES OUVRAGES ET TRAVAUX

Les travaux et ouvrages décrits ci-après se réfèrent aux plans 07C39-100 et 07C39-101 donnés en annexe. Ils se basent sur les relevés effectués in situ par le bureau RWB.

### Travaux préparatoires

L'accès au lit de la rivière peut s'effectuer via le chemin de la Foulaz. Les travaux préparatoires suivants devront être effectués :

- Suppression de la passerelle d'accès piéton à l'immeuble (Figure 19) pour permettre l'accès de camions en rive droite. La passerelle sera ultérieurement remplacée par un dispositif facilement amovible permettant un accès par camion en proximité immédiate de la centrale.
- Déviation des conduites industrielles (Figure 20) fixées à la passerelle du chemin piétonnier liant la rive droite (La Foulaz 5) et la rive gauche (STEP).
- Construction d'un batardeau provisoire permettant de dévier le cours d'eau et d'assécher le lieu du chantier.



Figure 19. Passerelle d'accès au bâtiment



Figure 20. Conduites industrielles

Les périodes d'intervention en rivière seront bien entendu fixées d'entente avec les services cantonaux compétents, notamment en fonction des périodes de fraie.

### Démolitions

Une fois l'accès dégagé et les travaux préparatoires effectués, les travaux de démolition des infrastructures existantes non utilisables pourront débuter de manière à permettre le début des travaux de terrassements. Les bâtiments et éléments suivants seront ainsi rasés :

- Baraquement en bois et tôle (anciennes centrales hydrauliques) situées sur le canal actuel. S'agissant de constructions légères posées sur des murs en pierre, elles seront facilement démontables. Leurs fondations faisant partie intégrante du canal seront, quant à elles, plus difficile de démolir.
- Fondations et mur du canal en maçonnerie, depuis la passerelle piétonne jusqu'à l'exutoire actuel du canal.
- Barrage et vannes de garde du canal, à l'exception des deux vannes motorisées en rive gauche.





Figure 21. Baraquements à démolir



Figure 22. Baraquements à démolir

La Figure 23 indique en superposition les structures à démolir, en jaune, et les structures à construire, en rouge.

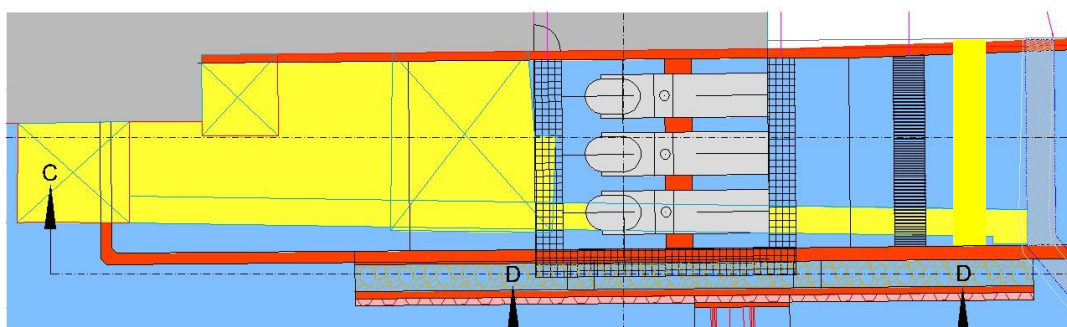


Figure 23. Vues en plan superposées des structures à démolir (en jaune) et des nouvelles structures à construire (en rouge)

L'ensemble des déchets résultant de ces démolitions sera trié (bois, béton, moellons, tôles, ferraille) et évacué en décharge contrôlée.

Les quantités estimées principales sont les suivantes :

- Volume des baraquements à démolir : 250 m<sup>3</sup>
- Surface de caillebotis : 25 m<sup>2</sup>
- Volume de mur en pierre : 120 m<sup>3</sup>



Figure 24. Passerelle piétonne



Figure 25. Vannes à démolir



## Terrassements

Une fois l'ensemble de la surface correspondant à l'emprise du futur ouvrage dégagée, les travaux d'excavation nécessaires à la pose des nouveaux équipements pourront débuter. Ceux-ci comportent des terrassements en pleine masse dans le lit du canal et de la rivière, ainsi qu'une reprise en sous-œuvre du bâtiment existant.

Le projet prévoyant une excavation sur une profondeur de 4 à 5 mètres au pied de l'immeuble existant, l'appui de ses fondations devra être assuré. Un mur de soutènement en béton sera dès lors construit sous le mur existant au fur et à mesure de l'avancement des travaux de fouille.

Les travaux d'excavation prévus se dérouleront selon les séquences suivantes :

1. Fouille sur une profondeur d'environ 1 mètre en pied de façade;
2. Excavation sous le mur du bâtiment sur une longueur réduite à déterminer;
3. Bétonnage d'un mur de soutènement sous le mur du bâtiment précédemment dégagé;
4. Fouille et bétonnage d'un nouveau tronçon de mur, au même niveau de terrassement;
5. Une fois le mur du bâtiment repris sur toute la longueur de la fouille, poursuite de l'excavation sur une nouvelle tranche de 1 m de profondeur;
6. Reprise en sous-œuvre du mur de l'immeuble selon le même principe ;
7. Etapes à répéter jusqu'à ce que l'excavation atteigne la cote permettant la réalisation du radier du canal aux cotes voulues.

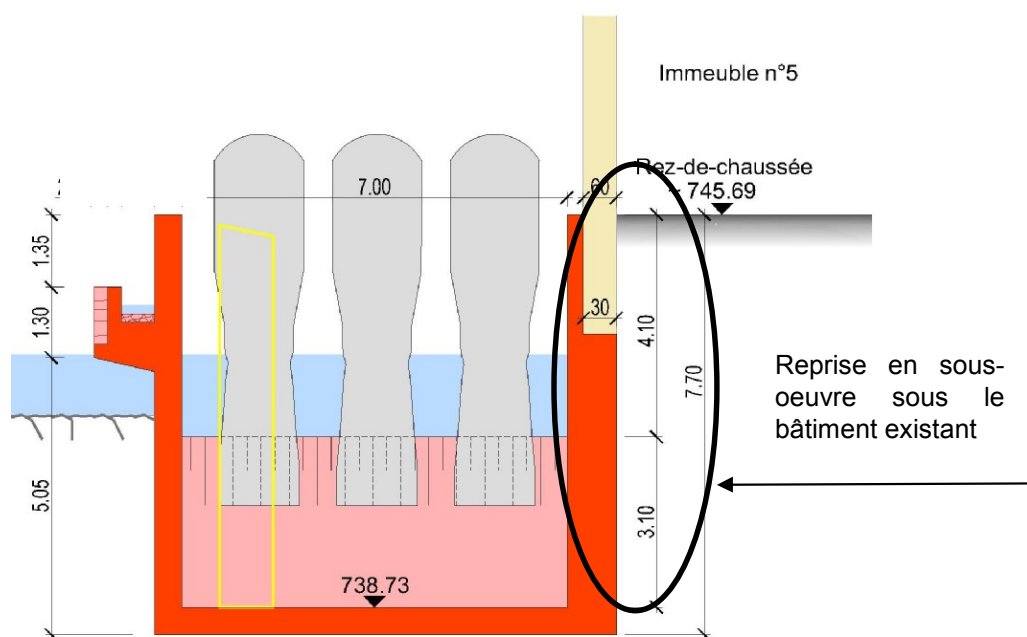


Figure 26. Zone de reprise en sous-œuvre du bâtiment existant

La réalisation d'ancrages sera éventuellement nécessaire selon le type de terrain rencontré sous le bâtiment. La qualité du sous-sol est actuellement inconnue et devra être vérifiée par sondage avant d'effectuer les travaux. La présence de matériaux graveleux poserait des problèmes de stabilité de la fouille, tandis que celle de rocher augmenterait le prix du terrassement, mais favoriserait la stabilité générale.

L'ensemble des matériaux excavés sera sorti de la fouille avec de petits engins, puis évacué en décharge contrôlée par l'entreprise.







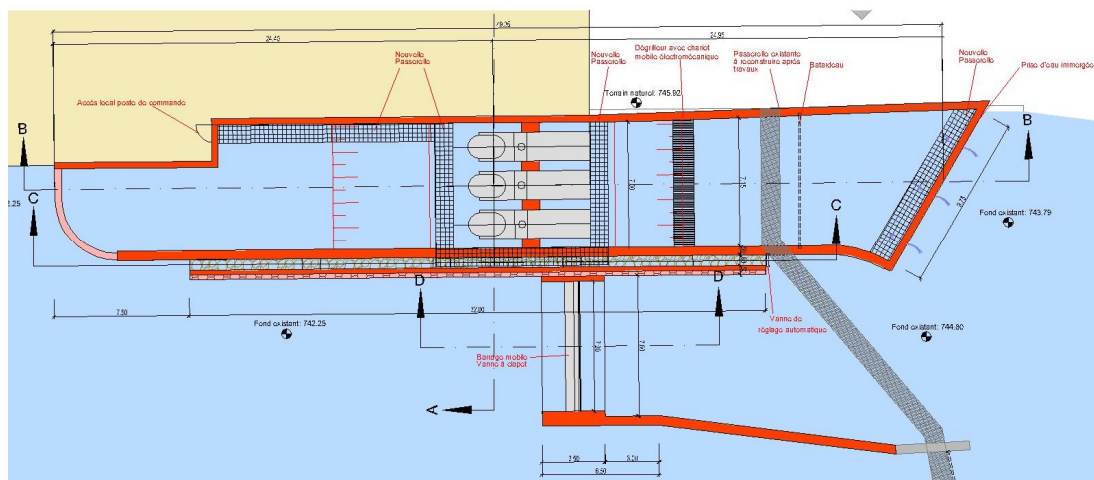


Figure 28. Vue en Plan des canaux d'amenée et de fuite de la centrale hydroélectrique ainsi que du passage de la vanne clapet.

Le siège de la vanne clapet aura une longueur de 3.5 m, pour une largeur de 7.0 m. Le mur latéral aura pour sa part une longueur de 15 à 20 m, l'emplacement définitif pouvant varier en fonction de la qualité du lit de la rivière. Son épaisseur sera de 50 cm. Le volume de béton correspondant sera au final de l'ordre des 40 m<sup>3</sup>.

## EQUIPEMENTS HYDRAULIQUES ET VANTELLERIE

### Grilles et dégrilleur

L'Orbe étant une rivière pouvant charrier de nombreux matériaux flottants (feuilles, algues, branches, etc.), il est nécessaire de protéger le canal d'alimentation des turbines par des grilles, dont l'espacement entre les barreaux ne devra pas excéder 25 à 30 mm.

Ces grilles auront une largeur identique à celle du canal, soit 7.0 m, et une profondeur de 2.0 m. Elles seront nettoyées par un dégrilleur à râteau mobile dont les caractéristiques définitives seront déterminées en phase de projet d'exécution.

S'agissant d'un environnement urbain, une attention particulière sera en outre accordée aux aspects liés au bruit lors du choix définitif du système.

Les matériaux collectés seront, si possible, évacués dans une rigole les renvoyant à la rivière, à l'exception des déchets non organiques.

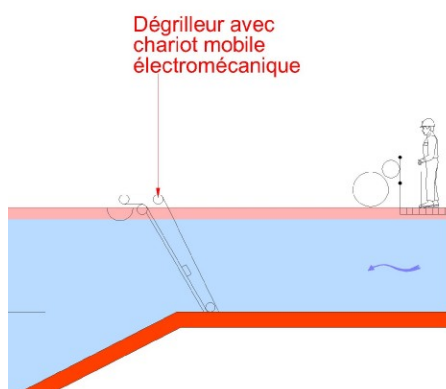


Figure 29. Vue en coupe de la grille et du dégrilleur en amont des turbines



Figure 30. Exemple de grilles et de dégrilleur





## Vanne clapet

Comme nous l'avons vu au chapitre 0 consacré à la gestion des crues, l'un des éléments clés de la petite centrale est la vanne clapet située entre le canal d'alimentation des turbines et les deux vannes planes existantes.

Celle-ci a pour mission d'assurer le réglage fin permettant de maintenir le niveau constant à l'amont de l'aménagement lorsque le débit de l'Orbe est supérieur à la capacité maximale des trois groupes hydroélectriques. C'est par ailleurs cette même vanne qui permet d'abaisser le niveau amont à la cote de référence déterminée pour permettre le fonctionnement des roues à aube du Musée du fer.

La vanne est constituée d'une lame commandée par des vérins. Elle s'abaisse progressivement en fonction de la consigne de niveau pour finalement complètement « disparaître » lorsqu'elle est totalement ouverte.

Ses dimensions sont de 5,0 m de largeur pour une hauteur permettant de « retenir » une hauteur d'eau de 1,0 m relativement à son assise. Son logement est en outre conçu de manière à pouvoir reprendre les efforts s'exerçant sur la vanne.

Les figures suivantes donnent un aperçu de ce type de dispositif.

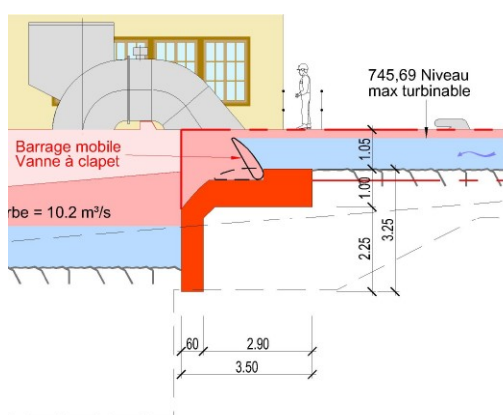


Figure 31. Vue en coupe de la vanne clapet



Figure 32. Exemple de vanne clapet

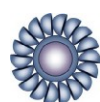
## Vannes planes existantes

Les vannes planes existantes (en entrée du canal de la STEP et en rive gauche de l'Orbe) sont motorisées et commandées par la STEP pour éviter tout risque d'inondation en cas de crue. La gestion du plan d'eau étant réalisée par l'aménagement hydroélectrique, il conviendra dès lors d'intégrer ces deux vannes dans le dispositif de contrôle et commande de la centrale.

## DÉFINITION DES ÉQUIPEMENTS HYDRO- ET ÉLECTROMÉCANIQUES

### Rappel des caractéristiques de l'aménagement

Altitude du niveau amont maximal en cas de crue exceptionnelle ( $Q_{\text{Orbe}} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ )	$Z_{0\text{ex}} \text{ (m)}$	746.42
Altitude du niveau amont nominal	$Z_{0\text{n}} \text{ (m)}$	745.69
Altitude du niveau amont Musée du fer ouvert et $Q_{\text{Orbe}} = 10.2 \text{ m}^3/\text{s}$	$Z_{0\text{nm}} \text{ (m)}$	745.50
Altitude du niveau amont minimal turbinable	$Z_{0\text{min}} \text{ (m)}$	745.20
Altitude niveau aval maximal ( $Q_{\text{Orbe}} = 70 \text{ m}^3/\text{s}$ )	$Z_{3\text{max}} \text{ (m)}$	744.00
Altitude du niveau aval nominal	$Z_{3\text{n}} \text{ (m)}$	743.33
Altitude du niveau aval avec une machine en service ( $Q_{\text{Orbe}} = 3.53 \text{ m}^3/\text{s}$ )	$Z_{3\text{m1}} \text{ (m)}$	742.89
Altitude du niveau aval minimal ( $Q_{\text{Orbe}} = 1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ )	$Z_{3\text{min}} \text{ (m)}$	742.69



Débit nominal turbinable	$Q_n$ (m <sup>3</sup> /s)	10.00
Nombre de groupes hydroélectriques	$Z_T$	3
Débit nominal par machine	$Q_n$ (m <sup>3</sup> /s)	3.33
Dénivellation nominale (différence d'altitude entre niveaux amont et aval nominaux)	$\Delta Z_n$ (m)	2.36
Dénivellation Musée du fer ouvert et $Q_{Orbe} = 10.2$ m <sup>3</sup> /s (différence d'altitude entre niveaux amont et aval à 10.2 m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Z_{nm}$ (m)	2.17
Chute nette nominale (en considérant une vitesse résiduelle de l'eau à la sortie de la turbine de 1.8 m/s et un débit total dans l'Orbe de 10,2 m <sup>3</sup> /s).	$H_n$ (m)	2.19
Constante de gravité à Vallorbe	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9.805

*Tableau 1. Rappel des caractéristiques de base de l'aménagement*

Les grandeurs dites nominales correspondent aux caractéristiques de base considérées pour le dimensionnement et la conception des équipements.

### Turbine

Les indications fournies pour la turbine sont issues des travaux effectués par le laboratoire MHyLab dans le cadre du développement des turbines siphon (voir chapitre 0). Les performances de la turbine (garanties de rendement, absence de problème de cavitation, fiabilité) correspondent à une machine développée en laboratoire et pour laquelle le constructeur peut prouver indiscutablement la provenance de ses garanties.

La volonté des futurs exploitants étant d'exiger une conception MHyLab, les caractéristiques annoncées sont par conséquent réalistes. Le tableau ci-après résume de manière synthétique les résultats du calcul de dimensionnement.

Type de turbine		Axiale siphon
Nombre de pales de la roue motrice	(-)	4
Nombre de Turbines	$Z_T$ (-)	3
Débit maximal de l'aménagement	$Q_{max}$ (m <sup>3</sup> /s)	10.00
Débit maximal par turbine	$Q_{maxT}$ (m <sup>3</sup> /s)	3.33
Débit minimal par turbine	$Q_{min}$ (m <sup>3</sup> /s)	0.40
Hauteur de chute nette à $Q_{max}$ avec trois machines en service	$H_{n3}$ (m)	2.19
Hauteur de chute nette à $Q_{maxT}$ avec une seule machine en service	$H_{n1}$ (m)	2.63
Energie massique à $Q_{max}$	$gH$ (J/kg)	21.47
Energie massique à $Q_{maxT}$	$gH$ (J/kg)	25.79
Type de réglage de la roue motrice		Pales réglables
Ouverture du distributeur fixe	(°)	40
Diamètre externe de la roue	$D_e$ (mm)	625
Vitesse de rotation	$N'$ (t/min)	155
Vitesse d'emballement maximale	$N'_r$ (t/min)	352
Hauteur d'implantation de la roue par rapport au niveau d'eau aval	$H_s$ (m)	0.34
Puissance mécanique maximale de l'installation	$P_m$ (kW)	175
Puissance mécanique maximale d'une turbine en fonction	$P_{maxT}$ (kW)	71

*Tableau 2. Caractéristiques principales des turbines*



La chute nette est calculée en considérant que la perte de charge dans la grille d'entrée du canal d'alimentation des turbines est négligeable, la vitesse étant faible, et que la vitesse restante dans l'aspirateur des turbines est égale à 1,8 m/s.

La puissance mécanique maximale de l'installation est calculée en considérant une chute nette correspondant à un débit dans l'Orbe de 10,2 m<sup>3</sup>/s et trois turbines en fonction. Le rendement de chacune des turbines est alors de 86.5 %, celui des paliers et du multiplicateur de vitesse étant de 94.0 %.

La puissance mécanique maximale d'une turbine est calculée en considérant une chute nette correspondant à un débit dans l'Orbe de 3.53 m<sup>3</sup>/s et une seule turbine en fonction. Le rendement de la turbine est alors de 88.2 %, celui des paliers et du multiplicateur de vitesse étant de 94.0 %.

De manière à optimiser la production d'énergie en fonction des débits disponibles, il est prévu que les trois machines disposent de roues motrices avec pales réglables.

La vitesse de rotation des turbines étant faible, il est prévu d'avoir recours à une multiplication de vitesse à courroie entraînant une machine électrique tournant à 750 t/min.

Le principe de la turbine siphon conduit à une installation sans vanne de garde et sans vanne de révision. La machine est amorcée par une pompe à vide. Elle est désamorcée par l'entrée d'air commandée par une soupape s'ouvrant en absence de courant et assurant ainsi la sécurité de la turbine, évitant l'emballement.

Le niveau de crue extraordinaire étant inférieur au point le plus bas du siphon, le risque d'auto amorçage peut être exclu à ce stade de l'étude. Ce point devra cependant être analysé de manière précise lors du projet d'exécution.

### **Mise en place, montage et démontage des turbogroupes**

Chaque turbogroupe comprend les différentes parties suivantes:

- un châssis en acier ancré dans le mur du canal,
- le conduit d'entrée à section carrée, qui sera fixé au mur du canal via le châssis,
- l'ensemble turbo-générateur (coude à 90°, arbre, roue, générateur, multiplicateur, manteau de roue), qui sera facilement démontable grâce à un système de boulonnage,
- l'aspirateur, sera fixé au mur du canal via le châssis,
- les armoires de contrôle-commande et de connexion au réseau qui seront situées dans le bâtiment existant.

Le démontage de l'ensemble turbo-générateur ne sera nécessaire que pour les opérations importantes de maintenance telles que le changement du palier de la turbine ou la révision de la roue. Ainsi, les opérations de montage-démontage seront rares, en principe tous les 10 ans pour un matériel de qualité.

La mise en place des équipements se fera au moyen d'un camion grue de capacité 15t.

### **Génératrice**

L'axe de la génératrice sera parallèle à l'axe de la turbine. Son bâti sera fixé sur le plat du coude d'entrée à section carrée. L'ensemble générateur-commande des pales-multiplication de vitesse sera par ailleurs capoté. Cette disposition permet:

- d'optimiser l'espace à disposition et d'éviter la création d'un bâtiment au dessus des turbines,
- de réduire les efforts sur les paliers,
- de simplifier le dispositif de commande des pales de la machine.



Type		Synchrone
Fréquence	Hz	50
Tension triphasée aux bornes	V	400
Vitesse de rotation	t/min	750
Vitesse d'emballement	t/min	1'750
Puissance électrique	kW	71
Cos $\varphi$	-	0.9
Puissance apparente	kVA	79
Classe de protection		IP23
Classe de refroidissement		IC 01

*Tableau 3. Principales caractéristiques des alternateurs*

Les paliers seront à roulements graissés, d'une durée de vie de 100'000 heures.

L'excitation triphasée sera à diodes tournantes, sans bague.

### Contrôle-commande

La petite centrale étant prévue pour fonctionner de manière entièrement automatique, sa régulation et son exploitation seront des plus simples, réduisant au minimum les interventions.

La régulation sera asservie au niveau d'eau amont, donné au moyen d'une sonde fonctionnant en 4 – 20 mA. En période d'activité du musée du fer, soit 7 mois par an, à raison de 9 heures par jour, la consigne de niveau est donnée par une sonde à poser sur la rivière à la hauteur du canal de fuite des roues hydrauliques. En dehors des heures d'ouverture et durant la période d'hiver, la consigne est donnée par une sonde placée en amont immédiat du seuil de La Foulaz.

Les turbines pourront fonctionner en automatique ou en manuel (mise en route et couplage au réseau), le fonctionnement normal étant bien entendu automatique.

En cas de déclenchement de réseau, le redémarrage se fera de manière automatique.

Les tableaux électriques comprendront la régulation de niveau agissant sur la commande des pales des groupes et sur le nombre de groupes en service, ainsi que le réglage de Cos  $\varphi$ .

En outre, les indicateurs suivants figureront sur les armoires : Voltmètre, wattmètre, fréquencemètre, mesure du Cos  $\varphi$ , synchroscope, compte tour, indicateur de niveau amont barrage, indicateur de niveau canal de fuite musée du fer, indicateur de charges des batteries de secours, compteur d'heures, compteur de démarrages, températures des roulements et des bobinages des alternateurs, arrêt d'urgence.

La surveillance inclura le traitement des alarmes suivantes : niveau amont insuffisant, surcharge alternateurs, survitesse, arrêt d'urgence, défaut de mise en marche, roulements alternateurs, bobinages, retour de courant, surcharge batteries, défaut batteries.

Le contrôle commande sera alimenté en 24 V CC et secouru par des batteries.

### Dispositif de sécurité

Tout dysfonctionnement de l'installation, y compris perte du réseau électrique, entraînera l'ouverture du disjoncteur principal, lequel commandera l'ouverture des soupapes de mise à l'atmosphère des siphons permettant leur désamorçage et empêchant l'emballement des groupes.

### Raccordement électrique

Le raccordement électrique se fera au réseau local de la Société Electrique du Châtelard dans un local attenant à l'immeuble de la Foulaz. Ce local comprendra en outre le comptage et la télétransmission en accord avec les directives relatives à l'OApel et à la RPC.



## Avantages de la solution proposée relativement à la situation actuelle.

Outre l'intérêt énergétique du projet, il est intéressant de relever ici les améliorations apportées par la solution proposée relativement à la situation prévalant actuellement. On peut en particulier citer les éléments suivants :

- La réalisation du projet implique la construction d'une échelle à poissons, supprimant ainsi un obstacle infranchissable sur le cours de l'Orbe.
- La partie du lit de la rivière à l'aval du barrage n'est jamais dénoyée, même en période de basses eaux.
- La passerelle existante qui supporte d'importantes conduites industrielles, n'est plus sollicitée dans les périodes de hautes eaux (cette passerelle est implantée dans la chute actuelle).
- Le barrage mobile à vanne clapet, associé aux deux vannes planes motorisées existantes, maintient automatiquement le niveau amont à une valeur légèrement variable de manière à garantir le bon fonctionnement des roues hydrauliques du Musée du fer en fonction du débit de la rivière, jusqu'à un débit de crue d'environ 46 m<sup>3</sup>/s. On réduit donc le risque d'inondation relativement à la situation actuelle avec un barrage fixe.
- Le réglage du niveau amont limitera fortement les problèmes d'érosion sur les rives en raison des marnages importants et fréquents de la rivière dus au turbinage de la centrale de La Dernier et évitera les inondations fréquentes des chemins pédestres en bordure de rivière.
- Le faible marnage résultant du maintien d'un niveau constant au Musée du fer, garanti le bon fonctionnement de la passe à poisson.

## Calculs de production

### PUISSANCE HYDRAULIQUE

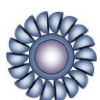
Le calcul de la puissance hydraulique instantanée de l'installation est effectué selon la formule suivante:

	$P_h = 10^{-3} \rho Q_t g H(Q_t; Q_{Orbe})$	[kW]
avec	$\rho$ = masse volumique de l'eau soit ici 999.5	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$Q_t$ = débit turbiné	[m <sup>3</sup> /s]
	$Q_{Orbe}$ = débit total de l'Orbe	[m <sup>3</sup> /s]
	$g$ = constante de gravité soit ici 9.805	[m/s <sup>2</sup> ]
	$gH(Q_t; Q_{Orbe})$ = énergie massique pour le débit turbiné $Q_t$ et le débit total dans l'Orbe	[J/kg]
	$H(Q_t; Q_{Orbe})$ = hauteur de chute nette pour le débit turbiné $Q_t$ et le débit total dans l'Orbe	[J/kg]

La formule suivante permet le calcul de l'énergie massique:

$$gH(Q_t; Q_{Orbe}) \cong g\Delta Z(Q_{Orbe}) - \frac{1}{2} \left( v_2 \cdot \frac{Q_t}{Q_{max}} \right)^2 \quad [J/kg]$$

avec $\Delta Z$	= dénivellation entre les niveaux d'eau amont et aval, fonction du débit de l'Orbe	[m]
$v_2$	= vitesse de l'eau en sortie d'aspirateur	[m/s]
$Q_t$	= débit turbiné	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{max}$	= débit d'équipement de la turbine	[m <sup>3</sup> /s]





Par mesure de simplification, on admet cependant que la perte cinétique en sortie d'aspirateur reste pour ainsi dire constante, le régime d'écoulement se dégradant dans l'aspirateur lorsque le débit est inférieur au débit de dimensionnement.

## RENDEMENTS

Le rendement global est défini comme le produit du rendement mécanique par le rendement de l'alternateur.

Le rendement mécanique est ici défini par la formule suivante:

$$\eta_{\text{mécanique}}(Q_t) = \eta_{\text{turbine}}(Q_t) \cdot \eta_{\text{paliers}} \cdot \eta_{\text{multiplicateur}}$$

avec:

- $Q_t$  : débit turbiné,
- $\eta_{\text{mécanique}}(Q_t)$  : rendement mécanique du turbogroupe en fonction du débit turbiné,
- $\eta_{\text{turbine}}(Q_t)$  : rendement de la turbine en fonction du débit turbiné, issu des essais en laboratoire, sans les pertes mécaniques dans les paliers,
- $\eta_{\text{paliers}}$  : rendement des paliers de la turbine, admis constant à 0.99, quel que soit le débit turbiné,
- $\eta_{\text{multiplicateur}}$  : rendement du multiplicateur de vitesse, fixé à 0.95 quel que soit le débit turbiné.

D'où:

$$\eta_{\text{mécanique}}(Q_t) = 0.99 \cdot 0.95 \cdot \eta_{\text{turbine}}(Q_t) = 0.94 \cdot \eta_{\text{turbine}}(Q_t)$$

Le rendement des alternateurs  $\eta_{\text{électrique}}(Q_t)$ , présenté à la Figure 33, est fonction du débit turbiné par rapport au débit nominal par machine.

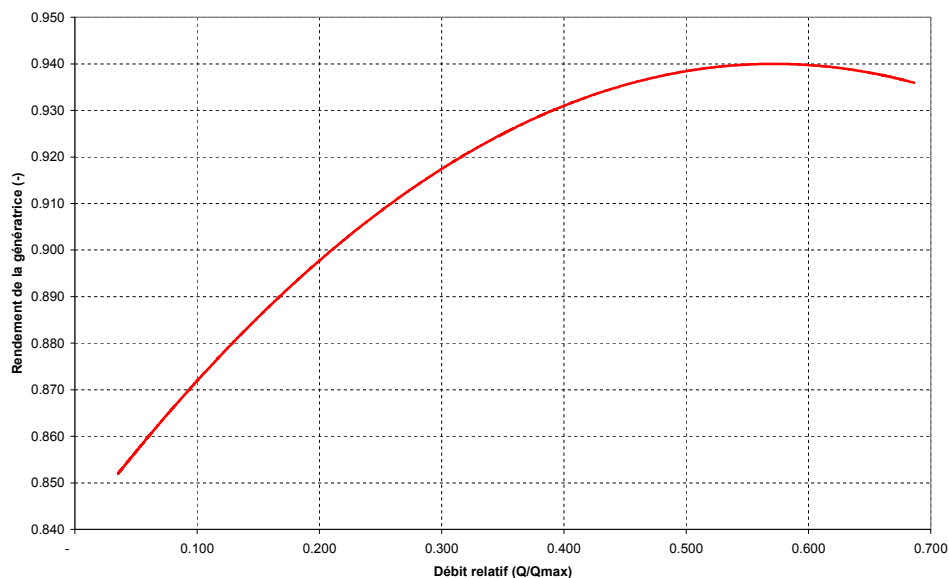


Figure 33. Courbe-type de rendement d'un alternateur

Finalement, le rendement de chaque groupe est donné par :

$$\eta_{\text{groupe}}(Q_t) = \eta_{\text{mécanique}}(Q_t) \cdot \eta_{\text{électrique}}(Q_t) = 0.94 \cdot \eta_{\text{turbine}}(Q_t) \cdot \eta_{\text{électrique}}(Q_t)$$



## PRODUCTION ÉLECTRIQUE ANNUELLE

La production électrique annuelle est calculée par intégration de la courbe des puissances électriques classées, grâce à l'expression :

$$E_{\text{tot}} = 10^{-3} \rho g \int Q_t \eta(Q_t) H(Q_t, Q_{\text{Orbe}}) dt \quad [\text{kWh/an}]$$

La chute diminuant fortement en cas de crue, le niveau aval rejoignant peu à peu le niveau amont, le calcul est effectué en considérant que durant les 6 jours en moyenne où le débit total de la rivière est supérieur à 46 m<sup>3</sup>/s, la centrale est à l'arrêt. Cette hypothèse peut être considérée comme prudente dans la mesure où il est fort probable qu'une production puisse tout de même être envisagée.

Un premier calcul est effectué en considérant un niveau amont constant à 745.69 m pour un débit dans l'Orbe inférieur ou égal à 46 m<sup>3</sup>/s, situation se produisant en moyenne 359 jours par an. Ce résultat correspond à une production maximale  $E_{\text{max}}$  qu'il serait possible d'atteindre si le Musée du fer était constamment à l'arrêt.

Tous calculs faits, la production annuelle est ainsi estimée à 759'336 kWh. Ce résultat doit cependant être pondéré pour tenir compte de la réduction de chute durant les heures d'exploitation du Musée. Il est alors nécessaire de déterminer un coefficient unitaire d'énergie à partir de  $E_{\text{max}}$ , en la rapportant à la dénivellation maximale nominale ( $\Delta Z_{\text{max}} = 2,36$ ).

$$k_E = \frac{E_{\text{max}}}{2,36 \cdot 8'760} = \frac{E_{\text{max}}}{20'674} \quad [\text{kWh}/(\text{an} \cdot \text{m} \cdot \text{h})]$$

C'est l'énergie que produirait cette même installation durant 1 h avec une dénivellation de 1 m.

Le Musée du fer est ouvert 7 mois par an 9 heures par jour, soit 1'917 heures sur 8'760. Il est donc fermé 6'843 heures. La production annuelle se répartit donc de la manière suivante :

$$E_1 = k_E \cdot 6'843 \cdot 2,36 = k_E \cdot 16'149 \quad [\text{kWh/an}]$$

$$E_2 = k_E \cdot 1'917 \cdot 2,17 = k_E \cdot 4'160 \quad [\text{kWh/an}]$$

Avec :

$$E = E_1 + E_2 = k_E \cdot (16'149 + 4'160) = k_E \cdot 20'309 \quad [\text{kWh/an}]$$

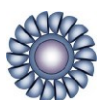
On peut finalement écrire :

$$E = \frac{E_{\text{max}}}{20'674} \times 20'309 = E_{\text{max}} \cdot 0,982 \quad [\text{kWh/an}]$$

On observe donc que le maintien du niveau d'exploitation au Musée à la cote 754,64 induit une perte de production de l'ordre de 1,8 % à La Foulaz. La production annuelle correspondante est ainsi de 745'668 kWh.

On admet par ailleurs que pour des raisons diverses, la production est interrompue 4% du temps, soit 10 jours par an. De plus, les fréquentes et importantes variations de débit de l'Orbe en raison de l'exploitation de la centrale de La Dernier conduiront à des pertes d'eau par déversement transitoires, lesquelles sont estimées à 1% de la production.

Au final, la production annuelle moyenne peut être estimée à **708'000 kWh**.



## Analyse économique

### INVESTISSEMENTS

Le montant des investissements a été calculé sur la base :

- du devis établi par le bureau RWB Eau et Environnement SA pour les travaux de génie civil,
- des estimations fournies par MHyLab pour les équipements hydro et électromécaniques.

Dans les deux cas, l'estimation des coûts est donnée à  $\pm 20\%$ .

Par ailleurs, la production électrique envisagée permettant un chiffre d'affaire supérieur aux limites nécessitant un assujettissement à la TVA, les montants sont donnés HT. Selon les indications reçues de la fiduciaire Fidatel SA à Lausanne, la société aura de ce fait la possibilité de récupérer la TVA sur les investissements nécessaires à la production d'électricité.

#### Investissements génie civil

##### Travaux préparatoires

- Dépose passerelle pour accès
- Construction d'un batardeau béton
- Pompage
- Démolition du batardeau
- déplacement des conduites industrielles
- Nouvelle passerelle accès maison.

Total travaux préparatoires : 23'000,- [CHF]

##### Démolition

- Ouvrages existants et fondations
- Taxes décharge
- Ancien mur du canal d'amenée
- Passerelle piétons
- Barrage avec vannes.

Total démolition : 62'000,- [CHF]

##### Terrassement

- Excavation dans terrain normal
- PV pour rocher
- Reprise sous-œuvre béton
- Étayage éventuel.

Total terrassement : 191'000,- [CHF]

##### Béton armé

- Radiers
- Murs
- Passe à poisson
- Porte de liaison avec bâtiment existant.

Total béton armé : 239'000,- [CHF]



### Eléments hydrauliques

- Batardeau amont
- Dégrilleur
- Vanne à clapet, portée 7 m
- Révision et modification des vannes existantes.

Total éléments hydrauliques : 305'000,- [CHF]

### Serrurerie

- Passerelle caillebotis

Total serrurerie : 14'000,- [CHF]

Total travaux I : 834'000,- [CHF]

Divers et imprévus : 18% 150'000,- [CHF]

Total travaux II 984'000,- [CHF]

Honoraires : 12% 118'000,- [CHF]

Total travaux III 1'102'000,- [CHF]

## **Investissements en électromécanique**

### Equipements

- 3 turbines de type siphon avec multiplicateur de vitesse et alternateur
- Système d'amorçage/désamorçage
- Contrôle commande
- Alimentation de secours
- Raccordement au réseau

Total Equipements : 850'000,- [CHF]

Divers et imprévus : 10% 85'000,- [CHF]

Total travaux I 935'000,- [CHF]

Honoraires : 8% 75'000,- [CHF]

Total travaux II 1'010'000,- [CHF]

## **Total des investissements**

Total Génie civil : 834'000,- [CHF]

Total Equipements : 850'000,- [CHF]

Total travaux I 1'684'000,- [CHF]

Divers et imprévus GC 150'000,- [CHF]

Divers et imprévus Equipements 85'000,- [CHF]

Total travaux II 1'919'000,- [CHF]

Honoraires GC 118'000,- [CHF]

Honoraires Equipements 75'000,- [CHF]

Total travaux III 2'112'000,- [CHF]



## CHIFFRE D'AFFAIRE ANNUEL

Le projet de la Foulaz a été annoncé le 1<sup>er</sup> mai 2008 à Swissgrid afin de pouvoir bénéficier de la RPC. Cette demande a été acceptée et le tarif est ainsi garanti sur 25 ans.

En effectuant le calcul de la RPC selon la formule en vigueur et la production prévue de 708'000 kWh par an, le prix de vente TTC est de 26.95 cts/kWh ou 25.05 cts/kWh HT. Le chiffre d'affaire annuel prévisible est donc de l'ordre des CHF 177'350.-.

L'hypothèse est par ailleurs faite que ce tarif pourra être maintenu au-delà de la durée de 25 ans, le marché de l'énergie évoluant plutôt à la hausse et dans un climat favorable aux énergies renouvelables.

## FRAIS D'EXPLOITATION

Les charges annuelles "e" d'exploitation comprennent :

- Frais courants de surveillance et d'entretien (1,5 h /semaine).
- Matériels, outillage, matières consommables.
- Frais moyens annuels de révision répartis par année. Dans toute centrale hydraulique, pour autant que l'usure par abrasion ou par érosion de cavitation soit faible, comme ce sera le cas pour la centrale de La Foulaz, on procède à une révision générale de chaque groupe au mois une fois toutes les 100'000 heures de fonctionnement ou tous les 10 ans d'exploitation.
- Assurances : multirisques, bris de machine et perte de production (3 mois), responsabilité civile générale et immobilière.
- Fiduciaire, comptabilité, gestion des comptes.
- Impôts.
- Abonnements et communications.
- Taxes pour les compteurs électriques.

Montant total des charges annuelles d'exploitation, évaluées par analogie avec des installations comparables à celles de La Foulaz :

$$e = 27'000,-- \quad \text{[CHF]}$$

## FRAIS FINANCIERS

Les frais financiers sont évalués sur la base des investissements en fonction des hypothèses suivantes :

- Le taux d'intérêt considéré est de 5 %. Il correspond aux recommandations de l'OFEN et paraît réaliste compte tenu du marché actuel et de la sécurité d'investissement que représente une petite centrale hydroélectrique. Ce taux est par ailleurs considéré comme indépendant de la nature des fonds.
- L'analyse économique se base sur un remboursement de l'emprunt par annuités constantes.
- Un premier calcul a été effectué pour une durée de 25 ans pour l'ensemble des composants. La durée de 25 ans est donnée par l'Ordonnance sur l'énergie. Le taux d'annuité correspondant à ces données est de 7.1%.
- Un second calcul a été réalisé sur la base d'une durée d'amortissement de 50 ans pour les ouvrages de génie civil, de 30 ans pour le matériel hydro et électromécanique et de 15 ans pour le matériel électronique. Ces durées d'amortissement sont standard pour les petites centrales hydro-





lectriques. Le coefficient d'annuité utilisé est une valeur pondérée en fonction de la répartition de l'investissement. Dans le cas présent, il se monte à 6.13 %.

#### CALCUL DU PRIX DE REVIENT DU KWH

Durée d'amortissement	25 ans	Variable
Production annuelle moyenne en kWh	708'000	708'000
Prix de vente du kWh HT en cts/kWh	25.05	25.05
Revenu annuel selon OEne en CHF	177'350	177'350
Investissement HT en CHF	2'112'000	2'112'000
Taux d'annuité en %	7.10	6.13
Annuité constante en CHF	149'952	129'465
Frais d'exploitation en CHF	27'000	27'000
Total des frais annuels en CHF	176'952	156'465
Prix de revient du kWh en cts	24.99	22.10
Marge annuelle en CHF	398	20'885

Tableau 4. Calcul du prix de revient du kWh

#### MARGE D'EXPLOITATION

Pour assurer une bonne gestion de la petite centrale hydroélectrique, il est nécessaire de prévoir une marge (risque + bénéfice) située entre 10% et 20% du chiffre d'affaire annuel. Il est indispensable de prévoir cette marge "m" dans le budget annuel pour absorber les aléas de la production, laquelle dépend des variations ordinaires de l'hydrologie et des événements non prévisibles comme les catastrophes naturelles ou des incidents graves sur les équipements électromécaniques non pris en charge par les assurances.

Dans le cas présent, la marge est nulle avec un amortissement sur 25 ans. Elle est par contre de 11.8% dans le cas de l'amortissement pondéré.

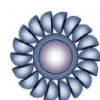
#### Conclusions

Le projet de réhabilitation de la petite centrale de La Foulaz à Vallorbe est techniquement réalisable. Sa réalisation permettrait par ailleurs d'améliorer sensiblement la situation de l'Orbe à cet endroit, que cela soit au niveau de la gestion des crues (non gérées actuellement) ou au niveau de la faune piscicole par l'aménagement d'une passe à poisson.

Le projet est par ailleurs financièrement réalisable, pour autant que la durée de concession soit suffisamment longue pour permettre un amortissement des infrastructures. Compte tenu de l'abandon du droit d'eau perpétuel dont dispose le site, il semble raisonnable de demander une concession d'une durée minimale de 60 ans.

En outre, on peut relever que les éléments suivants pourraient influencer favorablement le projet :

- Compte tenu de l'amélioration nette et indiscutable de la situation piscicole et de la protection contre les crues, d'éventuelles subventions pourraient être accordées au niveau cantonal et/ou fédéral.
- La RPC comprend aujourd'hui la TVA, ce qui va à l'encontre de la volonté énoncée par le titre même de rétribution à prix coûtant. En effet, une taxe pouvant varier sur simple décision politique ne devrait pas être prise en compte dans ce calcul. Une action en ce sens est en cours au niveau du Parlement fédéral et plus particulièrement au niveau de la commission des taxes.



Au final, on ne peut que recommander la poursuite du projet avec pour première étape une demande de **concession d'une durée minimale de 60 ans** au SESA.

En cas de succès de cette démarche, il sera alors nécessaire de passer à l'étape de projet d'exécution en vue de l'obtention du permis de construire.

## **Annexes**

- Annexe 1: Plan de situation au 1:100 No 07C39-100 – Vue en plan
- Annexe 2 : Plan au 1 :100 No 07C39-101 – Coupes
- Annexe 3 : Plan de situation au 1 :5000 No 07C39-102

Clarens et Vaux-sur-Morges, le 15 avril 2009

Raymond Chenal, Ingénieur ENSAM

Vincent Denis, Ingénieur EPFL-SIA

