



RÉHABILITATION DU MOULIN DE LA PALAZ A VUFFLENS-LA-VILLE

ETUDE DE FAISABILITÉ

Rapport final

Auteurs

MHyLab

En Platé, 1354 Montcherand, info@mhyllab.com, www.mhyllab.com

RWB Eau & Environnement SA

Epervier 4, 2053 Cernier, cernier@rwb.ch



Date: 16.05.08

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

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

Numéro de projet: 102058

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

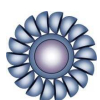


Table des matières

Résumé	4
Introduction	5
Situation.....	5
Données de base	5
Hydrologie.....	5
Débits de la Venoge au niveau de la prise d'eau du Moulin de Palaz.....	5
Courbe des débits classés et débits turbinables	6
Débit maximal turbinable selon les canaux	7
Dénivellation exploitable	10
Chute nette	12
Installation d'une turbine.....	12
Calcul de la production	13
Génie civil	15
Prise d'eau	15
Canal d'amenée.....	15
Station de turbinage.....	15
Canal de fuite	15
Raccordement électrique.....	16
Etude économique.....	16
Estimation des charges d'exploitation	16
Investissement	17
Prix de vente	17
Calculs économiques.....	17
Résumé des caractéristiques techniques et économiques.....	18
Conclusions, remarques et suggestions	19
Annexes.....	19



Résumé

Le Moulin de la Palaz, à Vufflens-La-Ville, dérive l'eau de la Venoge par un canal d'amenée de 660 m de long et un canal de fuite de 520 m, empruntant l'ancien lit de la rivière.

Le site bénéficie d'un droit d'eau perpétuel de 1952 limitant le débit à 1'200 l/s et la chute théorique à 5.55 m. Il était équipé de deux turbines à axe horizontal de 20 chevaux chacune, soit 15 kW en tout, hors service depuis plus de 25 ans.

La réhabilitation du Moulin avec un tel débit maximal ne saurait être rentable, même dans les conditions de rétribution actuelles.

Etant donné la longueur des canaux, une augmentation de la section de passage selon des coûts de génie civil modérés n'est pas envisageable. Ainsi, une intervention minimale sur les canaux permettrait de faire transiter un débit maximal de 1.35 m³/s. Avec une dénivellation de 3.7 m disponible pour une turbine axiale de type Kaplan en chambre d'eau, le site pourrait générer une puissance électrique maximale de 39 kW, ou une production de 247'000 kWh/an, pour un prix de revient estimé à $\pm 30\%$ à 33.4 cts/kWh, à comparer avec le prix de vente selon l'Ordonnance sur l'Energie de mars 2008 de 28.7 cts/kWh.



Introduction

Dans le cadre du programme de développement des petites centrales hydroélectriques, MHyLab a été mandaté, en collaboration avec le bureau de génie civil RWB SA, par Romande Energie pour effectuer une étude de faisabilité de la réhabilitation du Moulin de la Palaz à Vufflens-La-Ville.

Cette étude complète celle, sommaire, effectuée en septembre 2006, qui a démontré la préfaisabilité technique et économique du projet, dans le cas d'une augmentation du débit concédé.

Ce type d'étude a pour objectif, d'une part, d'évaluer la faisabilité technico-économique du projet et, d'autre part, d'en préciser l'optimum.

Situation

Le Moulin de la Palaz (prise d'eau: 530020/159330, restitution: 530520/158740), à Vufflens-La-Ville, dérive l'eau de la Venoge par un canal d'amenée de 660 m de long et un canal de fuite de 520 m, empruntant l'ancien lit de la rivière (cf. plan de situation de l'Annexe 2).

Le site bénéficie d'un droit d'eau perpétuel de 1952 (concession n°517) limitant le débit à 1'200 l/s et la chute théorique à 5.55 m. Il était équipé de deux turbines à axe horizontal de 20 chevaux chacune, soit 15 kW en tout, hors service depuis plus de 25 ans.

L'étude sommaire a permis de retenir une solution correspondant à un turbogroupe axial, d'un débit d'équipement de 2.4 m³/s, pour une puissance électrique de 49 kW. Cette réalisation demanderait donc la négociation d'un nouveau droit d'eau.

Données de base

Les constantes de base suivantes sont considérées :

Accélération de la pesanteur	g	m/s ²	9.806
Température moyenne de l'eau	T _{eau}	°C	10
Masse volumique de l'eau à 10°C	ρ	kg/m ³	999.7

HYDROLOGIE

Débites de la Venoge au niveau de la prise d'eau du Moulin de Palaz

Les débits de la Venoge sont compilés quotidiennement par l'Office Fédéral de l'Environnement:

- depuis 1979 au niveau d'Ecublens (coordonnées: 532'040 / 154'160),
- de 1948 à 1978, au niveau de Lussery.

Connaissant les bassins versants (cf. Annexe 4), les débits de la Venoge au niveau de la prise d'eau du Moulin de la Palaz peuvent être interpolés comme explicité dans la formule suivante:

$$Q_{Vufflens} = Q_{Ecublens} \cdot \frac{S_{Vufflens}}{S_{Ecublens}} \quad [m^3/s]$$

Avec:

- Q_{Vufflens}: débit de la Venoge, à Vufflens-La-Ville, au niveau de la prise d'eau du Moulin de la Palaz [m³/s]
- Q_{Ecublens}: débit de la Venoge, à Ecublens [m³/s]
- S_{Vufflens}: surface du bassin versant alimentant le cours d'eau en amont de la prise d'eau du Moulin de la Palaz [km²]



- S_{Ecublens} : surface du bassin versant alimentant le cours d'eau au niveau d'Ecublens, soit 231 (donnée de l'annuaire hydrologique) [km²]

La surface du bassin versant alimentant la Venoge jusqu'à la prise d'eau du Moulin de la Palaz est déterminée à partir du bassin versant de Lusserly de 165 km² (donnée de l'annuaire hydrologique), auquel sont ajoutés les parcelles alimentant la Venoge entre Lusserly et la prise d'eau (se reporter à la carte des bassins versants à l'Annexe 4).

$$S_{\text{Vufflens}} = S_{\text{Lusserly}} + P_{\text{xxx}} \quad [\text{km}^2]$$

Avec:

- S_{Lusserly} : surface du bassin versant alimentant le cours d'eau au niveau de Lusserly, soit 165 (donnée de l'annuaire hydrologique) [km²]
- P_{xxx} : surfaces des parcelles alimentant la Venoge entre Lusserly et la prise d'eau du Moulin de la Palaz [km²]

$$S_{\text{Vufflens}} = 165 + 33 = 198 \quad [\text{km}^2]$$

Finalement:

$$Q_{\text{Vufflens}} = 0.86 \cdot Q_{\text{Ecublens}} \quad (1) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

La Figure 1 représente les débits de la Venoge d'amont en aval, à Lusserly, Vufflens-La-Ville et Ecublens.

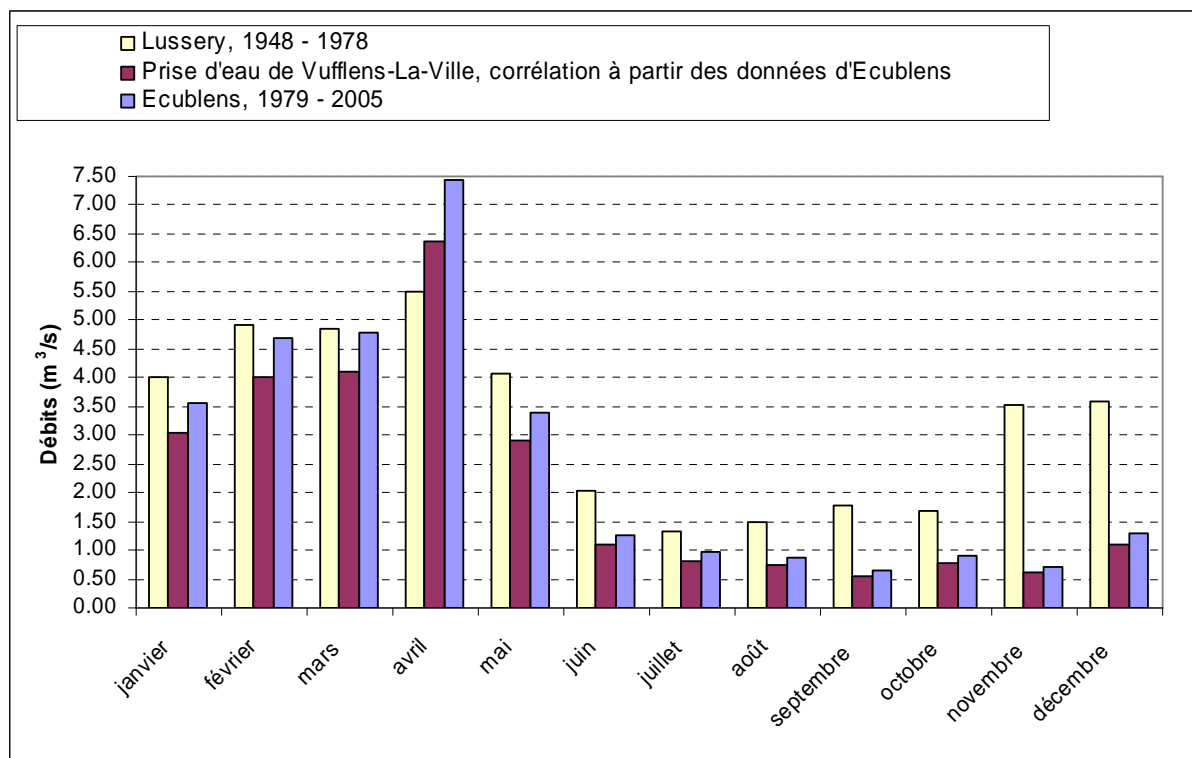


Figure 1. Débits mensuels à Lusserly, Vufflens-La-Ville et Ecublens

Ainsi, la Venoge présente un débit moyen de 2.2 m³/s au niveau de Vufflens-la-Ville, avec une période de hautes eaux de janvier à mai.

Courbe des débits classés et débits turbinables

La Figure 2 montre la courbe des débits classés de la Venoge à Vufflens-La-Ville issus de l'équation (1).

D'après l'article 31 de la Loi fédérale sur la protection des eaux (Leaux), le débit résiduel dépend du



débit atteint ou dépassé 347 jours dans l'année, qui est ici, au niveau du Moulinet de l'ordre des 470 l/s pour les années 1979 à 2005. Or pour un débit Q_{347} compris entre 160 et 500 l/s, le débit résiduel est de 130 l/s pour un Q_{347} de 160 l/s, auquel s'ajoutent 4.4 l/s par tranche de 10 l/s. Finalement, le **débit résiduel minimal est estimé à 267 l/s**. Il devra être confirmé par le SESA, en fonction du PAC-Venoge.

La Figure 2 montre la courbe des débits classés disponibles pour le turbinage.

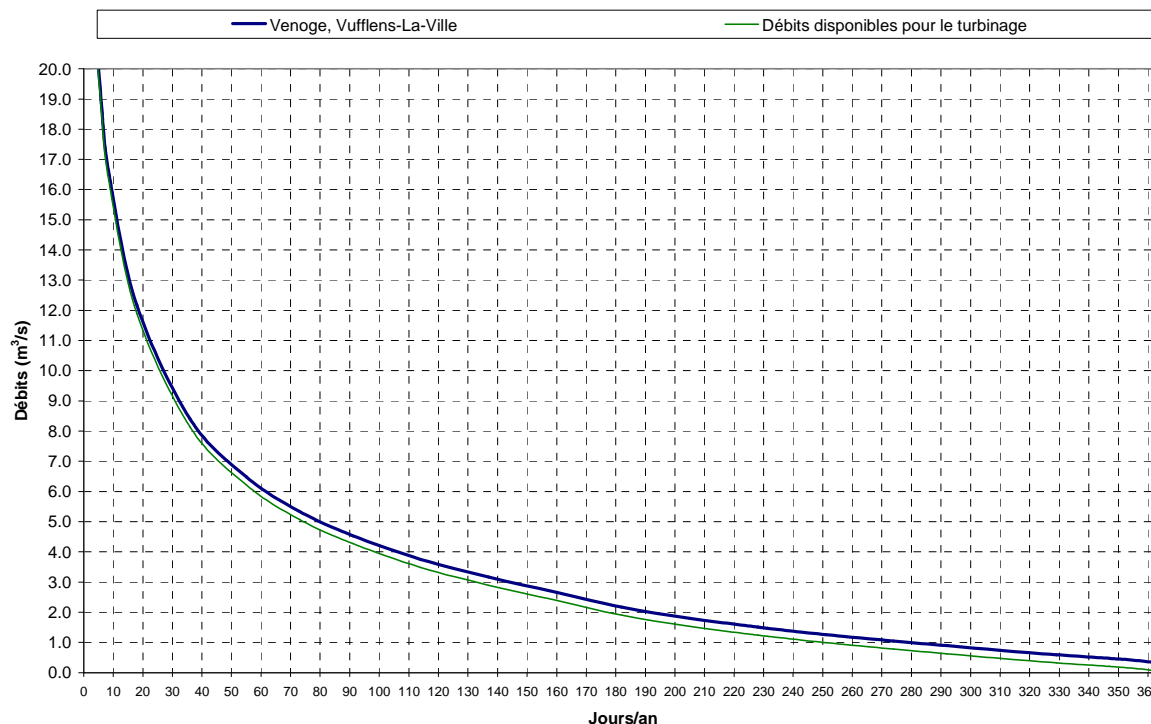


Figure 2. Courbes des débits classés pour la Venoge à Vufflens-La-Ville et des débits disponibles pour le turbinage

Ainsi, face à la courbe des débits classés disponibles pour le turbinage, le débit d'équipement maximal qu'il serait possible de considérer pour le Moulin de la Palaz est de **6 m³/s**, atteint ou dépassé plus de 55 jours dans l'année. Or la concession stipule un **débit maximal de 1.2 m³/s**, atteint ou dépassé plus de 230 jours par an.

DÉBIT MAXIMAL TURBINABLE SELON LES CANAUX

L'objectif étant de limiter les travaux de génie civil pour des raisons de coût, et d'intégrer le nouveau turbogroupe au site de manière optimale, il s'agit de déterminer le débit maximal pouvant transiter dans les canaux d'amenée et de fuite existants.

D'une longueur de 660 m et d'une largeur de 2.5 m, le canal d'amenée est notamment utilisé à des fins piscicoles, et s'est partiellement comblé de sédiments en particulier au niveau de la prise d'eau. Aujourd'hui, la hauteur d'eau dans ce canal est de l'ordre des 20 cm.

Une chambre d'eau devra être construite au niveau de la chute entre le canal d'amenée et le canal de fuite (voir Photo 6). La crête de cette chambre est **limitée à 406.9 msm** par le locatif attenant, et en particulier la hauteur des fenêtres, le fond du lit étant à 406.2 msm. Par conséquent, ce niveau d'eau amont sera maintenu constant à 406.9 msm par la turbine qui s'ouvrira ou se fermera en fonction des débits disponibles (cf. plan de l'Annexe 2).



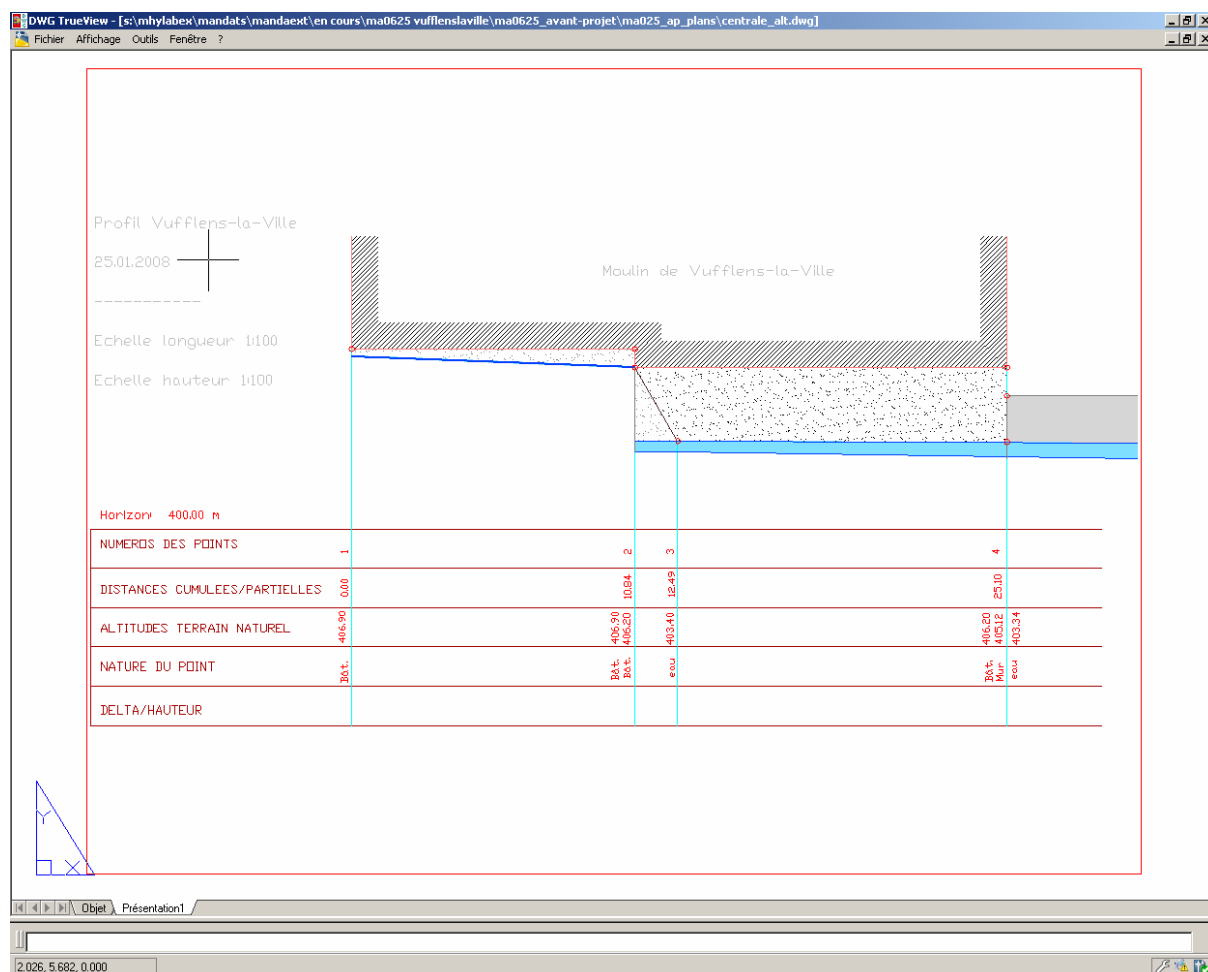


Figure 3. Profil en long au niveau de la chute (source: Romande Energie)

Le débit maximal transitant dans le canal peut être déterminé en utilisant l'équation suivante:

$$Q = K \cdot r^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{J} \cdot A \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Avec:

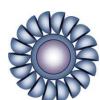
Q: débit maximal transitant	[m ³ /s]
K: coefficient de Strickler, ici K = 35	[-]
r: rayon hydraulique de la section de passage	[m]
J: pente de la ligne d'eau	[-]
A: section de passage moyenne	[m ²]

La section de passage moyenne, de type rectangulaire, a une largeur de 2.5 m pour une hauteur de 0.7 m (406.9 msm – 406.2 msm) au droit de la chute, tandis que le coefficient de Strickler est fixé à 35, correspondant à un canal droit, sans bassins, avec de la végétation.

La pente de la ligne d'eau est supposée, à ce stade de l'étude, correspondre à la pente du fond du lit. Derrière la prise d'eau, donc au début du canal d'amenée, se trouve un petit bassin dont le fond est à 407.15 m.

$$J = \frac{\text{dénivelé} \cdot \text{du} \cdot \text{canal}}{\text{longueur} \cdot \text{du} \cdot \text{canal}} = \frac{407.2 - 406.2}{660} = 0.15 \quad [\%]$$

Finalement, le calcul par itération donne un **débit maximal transitant de 1.35 m³/s**, atteint ou dépassé plus de 215 jours par an. Il est à noter la vitesse d'écoulement de 0.8 m/s, ce qui est inférieur à la



vitesse d'approche maximale pour la turbine (afin de limiter les remous de surface).



Photo 1. Prise d'eau actuelle vue de l'amont



Photo 2. Prise d'eau actuelle vue de l'aval



Photo 3. Canal d'amenée



Photo 4. Canal d'amenée



Photo 5. Chute du Moulin de la Palaz, vue depuis l'amont



Photo 6. Chute du Moulin de la Palaz, vue depuis l'aval





Photo 7. Canal de fuite



Photo 8. Canal de fuite

D'une longueur de 520 m, selon une pente de 0.13 %, le canal de fuite permet d'évacuer un débit supérieur à 2 m³/s.

Finalement, afin de ne pas intervenir sur le canal d'amenée, qui se trouve en zone forestière, et de limiter les coûts de génie civil, **le débit d'équipement de la turbine sera de 1.35 m³/s.**

DÉNIVELLATION EXPLOITABLE

Le droit d'eau permanent précise les niveaux suivants:

- Couronnement du barrage: 408.20 msm,
- Seuil d'entrée du canal d'amenée: 407.27 msm,
- Restitution à la Venoge (niveau du lit): 401.72 msm.

La dénivellation théorique du site, définie ici comme la différence entre le niveau du seuil d'entrée du canal et celui de la restitution est de **5.55 m** (407.27 msm – 401.72 msm).

Des mesures d'altitude effectuées par Romande Energie en décembre 2007 confirment le niveau de la crête du barrage.

En considérant une lame d'eau dans la Venoge de 10 cm au niveau du seuil, compte tenu qu'en moyenne 215 jours par an, le débit restant dans le lit de la Venoge sera supérieur au débit résiduel de 267 l/s, le niveau brut d'eau amont est d'environ **408.3 msm**.

Le niveau d'eau de la Venoge à la restitution est considéré ici comme constant à **402.2 msm** soit une hauteur d'eau à la restitution de 50 cm. Il conviendrait dans une étude détaillée de préciser l'évolution du niveau d'eau de la Venoge en ce point de restitution selon ses débits.





Photo 9. Seuil sur la Venoge, vu depuis la prise d'eau

Donc, la **dénivellation brute du site est de 6.1 m**, définie par:

- Niveau d'eau amont au seuil: 408.3 msm,
- Niveau d'eau aval à la restitution: 402.2 msm.

Compte tenu du débit d'équipement de $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$, la **puissance hydraulique brute maximale** du site est de **80 kW**. De plus, l'**énergie hydraulique brute du site**, compte tenu de la courbe des débits classés, est de **556'000 kWh/an**.

Le niveau d'eau en amont de la chute est limité à **406.9 msm** par la hauteur des fenêtres du locatif attenant au canal d'amenée (cf. plan de l'Annexe 2). La turbine sera régulée à ce niveau d'eau de manière à le maintenir constant et à éviter tout déversement.

Le fond du canal de fuite, d'une longueur de 520 m, est à environ 402.9 msm au droit de la chute, et à 401.7 msm à la restitution.

A ce stade de l'étude, nous supposons que:

- le fond du lit du canal de fuite est maintenu tel que, de manière à limiter les coûts de génie civil,
- la hauteur d'eau dans le canal de fuite au droit de la chute est constante avec les débits à 0.5 m.

Finalement, le niveau d'eau aval pour la turbine est considéré à **403.2 msm** pour tous les débits.

Il est à noter que dans une étude détaillée, un bureau d'ingénieurs spécialisé dans l'étude des écoulements hydrauliques devra préciser l'évolution des lignes d'eau dans les canaux d'amenée et de fuite, en fonction de la perte de charge dans les canaux et des débits de la rivière.

Ainsi, la **dénivellation disponible pour le turbinage selon l'infrastructure est de 3.7 m**, considérée à ce stade de l'étude comme constante, soit une perte par rapport à la dénivellation brute du site d'environ 40 %. Elle est alors définie par:

- Niveau d'eau amont au droit de la chute: 406.9 msm,
- Niveau d'eau aval au droit de la chute: 403.2 msm.



La puissance hydraulique brute disponible pour le turbinage est de 49 kW, tandis que l'énergie hydraulique brute s'élève à 339'000 kWh/an.

Une possibilité d'exploiter la dénivellation brute de 6.1 m serait de mettre en charge les canaux et de placer la turbine à la restitution. De manière à ne perdre que 5 % de la dénivellation, une conduite de 1'169 m de longueur et 1.5 m de diamètre interne (pour un débit de 1.35 m³/s) devrait être posée. Cette solution ne sera pas envisagée ici pour des questions environnementales, esthétiques et financières.

CHUTE NETTE

Vu la définition de la dénivellation, la chute nette, prenant en compte uniquement les pertes cinétiques dans l'aspirateur de la turbine, peut être calculée comme suit:

$$H(Q_t) = \Delta Z - \frac{\left(v \cdot \frac{Q_t}{Q_{\max}} \right)^2}{2g} \quad [\text{m}]$$

Avec:

$H(Q_t)$: chute nette au débit turbiné	[m]
Q_t : débit turbiné	[m ³ /s]
Q_{\max} : débit d'équipement, soit 1.35	[m ³ /s]
ΔZ : dénivellation, soit 3.7	[m]
v : vitesse en sortie d'aspirateur au débit d'équipement, soit 1.8	[m/s]

Le choix d'une vitesse de 1.8 m/s à la sortie de l'aspirateur pour le débit d'équipement est un compromis entre la récupération de l'énergie cinétique dans l'aspirateur et les conditions d'écoulement en sortie de turbine.

Compte tenu de la perte cinétique, la puissance hydraulique nette du site est de 47 kW et l'énergie hydraulique nette est de 325'000 kWh/an.

Installation d'une turbine

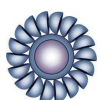
Les débits disponibles, les chutes nettes correspondantes et l'infrastructure du site imposent le choix d'une turbine axiale Kaplan à 4 pales mobiles et à distributeur fixe, à axe vertical et à chambre d'eau.

Le dimensionnement de la turbine prend en compte les critères suivants:

- le rendement maximal est atteint pour le débit d'équipement de 1.35 m³/s, atteint plus de 225 jours par an,
- le diamètre de roue est minimal, et la vitesse de rotation maximale, afin de limiter la taille du turbogroupe et de favoriser son intégration au site, dans le but de limiter les coûts,
- le comportement en cavitation sous une telle chute n'est pas problématique pour une turbine à 4 pales développée en laboratoire.

La vitesse naturelle de la turbine pour la variante retenue étant de 294 t/min, le choix d'un multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice s'impose. Nous choisissons dès lors une vitesse de 1'000 t/min pour la génératrice, ce qui correspond à des rendements élevés, une taille réduite et un grand choix dans l'offre. Il est à noter qu'une vitesse de rotation de 750 t/min, qui correspond à une génératrice moins bruyante, est également possible.

Le Tableau 5 résume les principales caractéristiques de la turbine, dont l'évolution du rendement en fonction des débits est donnée à la Figure 4. Le croquis d'encombrement de la turbine correspond à l'Annexe 5.



Calcul de la production

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

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

où E_{tot} = production électrique totale annuelle [kWh/an]

$\eta(Q_t)$ = rendement global de l'installation, produit du rendement, de la turbine, des paliers, du multiplicateur de vitesse et de l'alternateur, fonction du débit [-]

Le rendement de la turbine en fonction du débit turbiné, issu des essais en laboratoire est présenté à la Figure 4.

Le rendement des paliers est fixé à 99 % quel que soit le débit, tandis que celui du multiplicateur est fixé à 95 %.

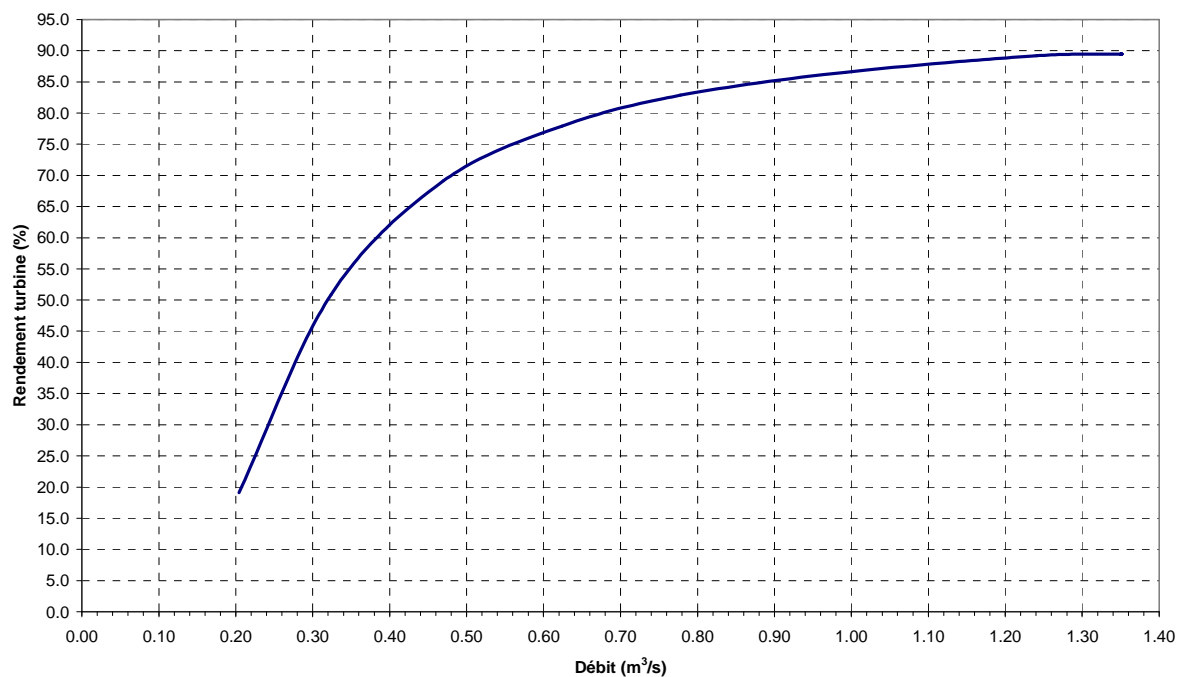


Figure 4. Evolution du rendement turbine en fonction du débit

Le rendement de la génératrice est donné selon des débits relatifs au débit d'équipement, comme montré sur la figure suivante.



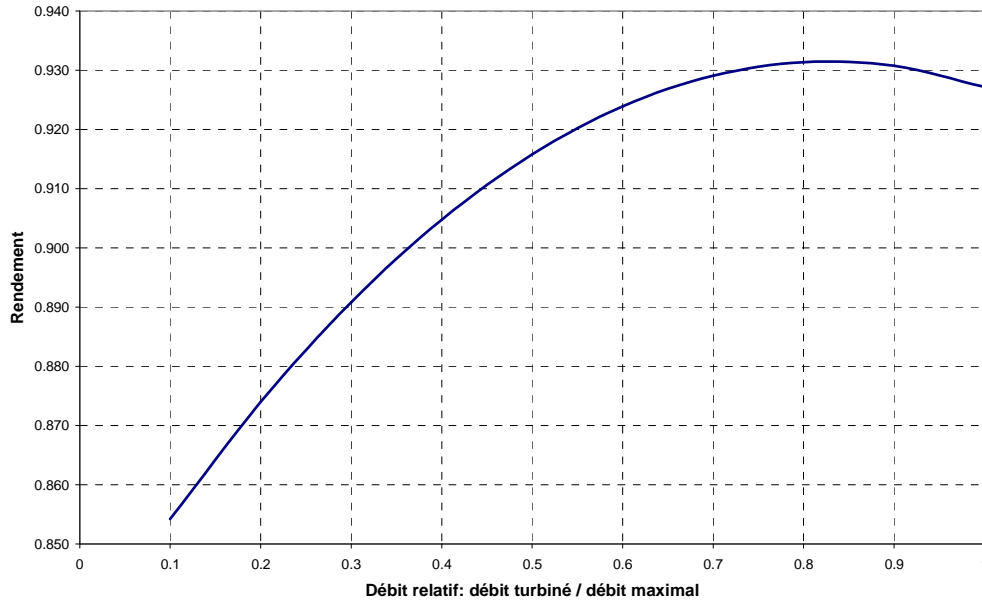


Figure 5. Courbe- type de rendement de la génératrice

La figure suivante montre le graphe des puissances classées, la surface délimitée par les courbes représentant l'énergie.

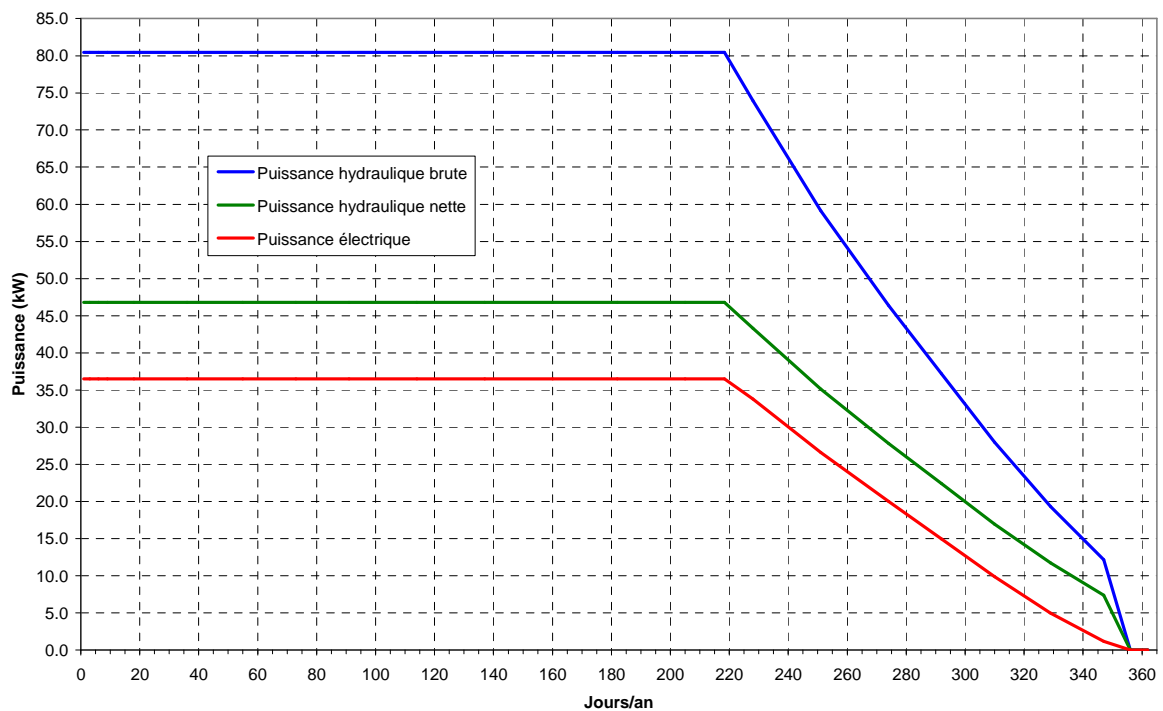


Figure 6. Courbe des puissances classées

Finalement, la production électrique s'élève à **247'000 kWh/an**, soit un rendement de 73 % par rapport à l'énergie hydraulique brute disponible pour la turbine de 339'000 kWh/an.

Il est à noter que les calculs de production sont réalisés avec un débit résiduel issu du Q_{347} , et estimé à 267 l/s. La révision à la hausse par le PAC Venoge de ce débit n'influerait sur la production que sur la trentaine de jours pendant lesquels le débit de la Venoge est inférieur au débit d'équipement et supérieur au Q_{347} .



Génie civil

PRISE D'EAU

Seule une intervention légère sera effectuée sur cet ouvrage (cf. Photo 1 et Photo 2), à savoir:

- Remise en état de la grille
- Curage du bassin derrière la grille
- Mise en place d'un nouveau batardeau

Il n'est pas prévu de toucher au lit de la Venoge ni de modifier le fond de celle-ci.

CANAL D'AMENÉE

Cf. Photo 3 et Photo 4.

- Section minimale: 250 x 70 cm
- Pente: 0.15 %
- Longueur: 660 m

Selon visualisation sur place, l'état général du canal semble bon. Aucun sondage ni prélèvement n'ont été réalisés pour confirmer cet état.

Le pont actuel constitué d'une tôle métallique doit être démolie et remplacé, afin de pouvoir garantir la section du cours d'eau sur toute la longueur du canal d'amenée et limiter la perte de charge.

Le passage sous les voies CFF est bien entendu conservé en l'état.



Photo 10. Pont à démolir



Photo 11. Passage sous les voies CFF

STATION DE TURBINAGE

La structure en béton armé pour recevoir la nouvelle turbine sera réalisée au niveau de la chute existante (cf. Photo 5, Photo 6 et plan de l'Annexe 2), ce qui limitera la démolition de l'existant. La fosse de sortie sera construite sous le lit aval actuel. Une reprise en sous-œuvre sous le bâtiment doit être réalisée selon le niveau des fondations actuelles de la maison.

Nous considérons qu'un local technique est disponible dans la maison attenante.

CANAL DE FUITE

Cf. Photo 7 et Photo 8.



- Section minimale: 250 x 100 cm environ
- Pente: 0.13 %
- Longueur: 520 m.

Comme le canal d'amenée, seul un nettoyage des berges est prévu.

Raccordement électrique

La centrale étant dans une zone locative, le raccordement au réseau se fera à proximité (environ 8 m) en 400 V au réseau de Romande Energie.

Les travaux de génie civil prévus sont les suivants:

- Sondage sur la canalisation souterraine existante,
- Fouille en banquette
- Pose d'un tube en PE 80/92.

Les travaux de génie électrique prévus sont les suivants:

- Tirage d'environ 8 m de câble
- Confection d'une dérivation souterraine
- Raccordement sous le tableau général de la petite centrale
- Fourniture du tableau d'installation intérieure avec protection fusible

L'Annexe 7 correspond au document remis par Romande Energie pour le raccordement électrique de la petite centrale de la Palaz. Il précise les travaux, le devis et s'accompagne d'un plan.

Etude économique

Cette étude économique a pour objectif d'approcher le prix de revient du kWh électrique à **plus ou moins 30 %**.

ESTIMATION DES CHARGES D'EXPLOITATION

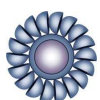
Compte tenu des travaux de génie civil prévus qui n'incluent pas le renforcement des berges des canaux ni l'introduction de dégrilleur, une personne devra se charger de contrôler de manière hebdomadaire toute l'installation. Ses principales tâches seront:

- D'évacuer les déchets pris dans la grille de la prise d'eau et dans celle de la station de turbinage,
- De nettoyer régulièrement les canaux et la chambre d'eau de la turbine: taille, évacuation des branchages, etc.

Finalement, les frais d'exploitation, comprenant les frais d'assurance, ainsi que les coûts de maintenance, d'entretien courant et de consommation d'énergie sont estimés à partir d'installations similaires, soit une moyenne de **CHF 30'000.- /an**.

Le changement des paliers de l'alternateur, réalisé de manière préventive, est prévu tous les 10 ans. Les frais inhérents à cette opération sont évalués à CHF 20'000.-.

Un changement de l'ensemble du contrôle commande peut être envisagé tous les 15 ans. Le montant de cette opération est chiffré à CHF 30'000.-.



INVESTISSEMENT

Les points suivants sont pris en compte:

- Les investissements sont donnés hors taxes.
- Pour le contrôle commande et le turbogroupe, l'estimation des coûts a été faite en se basant sur des réalisations comparables.
- Les coûts de raccordement électrique ont été devisés par Romande Energie (cf. Annexe 7).
- Les coûts des travaux de génie civil ont été estimés par RWB (cf. Tableau 1). L'Annexe 6 en détaille le devis. Il est à noter que seule une étude détaillée permettra de préciser les coûts liés à la remise en état des canaux.

Prise d'eau	35'000
Canal d'amenée	15'000
Suppression du pont sur le canal d'amenée	30'000
Génie civil - centrale	170'000
Canal de fuite	15'000
Total Génie civil	265'000

Tableau 1. Estimation des investissements en génie civil (CHF) (cf. Annexe 6)

Les frais d'ingénierie, les divers et les imprévus sont évalués à 25 % de l'investissement, dont environ 15 % de divers et imprévus.

Electromécanique	275'000
Contrôle-commande et armoires électriques	50'000
Génie civil	265'000
Ingénierie, divers et imprévus	150'000
Investissement total	740'000

Tableau 2. Estimation des investissements (CHF)

PRIX DE VENTE

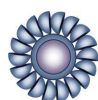
Cette centrale réhabilitée pourra bénéficier du prix de vente défini par le projet d'Ordonnance sur l'Energie du 14 mars 2008 (OEne), dont le calcul est présenté dans le Tableau 3.

Débit	m ³ /s	1.35
Dénivellation	m	3.7
Puissance électrique	kW	39
Production électrique maximale	kWh/an	247'000
Part de l'investissement en GC	%	36
Puissance équivalente	kW	28
Rétribution de base par classe de puissance	cts/kWh	22.1
Bonus de pression	cts/kWh	4.2
Bonus d'aménagement	cts/kWh	2.4
Prix de vente final	cts/kWh	28.7

Tableau 3. Calcul du prix de vente selon la nouvelle Ordonnance sur l'Energie

CALCULS ÉCONOMIQUES

Ce calcul prend en compte les éléments suivants:



- Le **taux d'intérêt** considéré dans cette étude est de **5 %**, taux recommandé par l'OEné, et que l'on peut considérer comme prudent sur le moyen terme,
- Le modèle économique se base sur un remboursement de l'emprunt par annuités constantes.
- La **durée d'amortissement** est de 25 ans, comme spécifié dans l'Ordonnance sur l'Energie,
- La totalité de l'investissement provient soit d'un emprunt bancaire, soit de capitaux propres rémunérés au même taux.
- Le prix de revient du kWh est déterminé en divisant la somme des frais annuels (annuité fixe et frais d'exploitation) par la production électrique annuelle, et a été calculé en considérant une année moyenne.

Investissement total	CHF	740'000
Frais d'exploitation standard	CHF/an	30'000
Production annuelle	MWh/an	247
Taux d'intérêt	%	5.0
Coefficient d'annuité sur 25 ans	%	7.1
Annuité	CHF/an	53'000
Prix de revient	cts/kWh	33.4
Bénéfice annuel	CHF/an	- 12'000

Tableau 4. Calculs économiques

Résumé des caractéristiques techniques et économiques

Altitude du seuil de la Venoge	Z_0 (msm)	408.2
Niveau d'eau amont au seuil de référence	msm	408.3
Altitude du fond du canal d'amenée au droit de la prise d'eau	msm	407.2
Niveau d'eau aval à la restitution	msm	402.2
Altitude du fond du canal de fuite à la restitution	msm	401.7
Dénivellation brute de référence	ΔZ_0 (m)	6.1
Altitude de la crête du seuil de la dérivation	Z_1 (msm)	406.9
Altitude du fond du canal d'amenée au droit de la turbine	msm	406.2
Niveau d'eau aval au droit de la chute	Z_2 (msm)	403.2
Niveau du fond du canal de fuite au droit de la chute	msm	402.9
Dénivellation disponible pour le turbinage	ΔZ_1 (m)	3.7
Débit d'équipement	Q_{\max} (m ³ /s)	1.35
Débit minimal	Q_{\min} (m ³ /s)	0.20
Chute nette maximale à Q_{\max}	H_n (m)	3.53
Type de turbine		axiale
Nombre de pales	(-)	4
Nombre de Turbines	Z_T (-)	1
Energie massique à Q_{\max}	$g H$ (J/kg)	35
Type de réglage		Distributeur fixe, pales réglables



Ouverture du distributeur fixe	(°)	40
Hauteur d'aspiration maximale	H_s (m)	> 4.0
Diamètre externe de la roue	D_e (mm)	840
Vitesse de rotation	N' (t/min)	294
Puissance hydraulique brute du site	P_{h0} (kW)	80
Energie hydraulique brute du site	E_{h0} (kWh/an)	556'000
Puissance hydraulique brute disponible pour la turbine	P_h (kW)	49
Energie hydraulique brute disponible pour la turbine	E_h (kWh/an)	339'000
Puissance hydraulique nette	P_{hn} (kW)	47
Energie hydraulique nette	E_{hn} (kWh/an)	325'000
Rendement maximal de la turbine	%	89.5
Rendement des paliers	%	99.0
Rendement du multiplicateur de vitesse	%	95.0
Rendement maximal de l'alternateur	%	93.0
Puissance électrique maximale	P_e (kW)	39
Production électrique	E_e (kWh/an)	247'000
Rendement de l'installation	%	73
Investissement total	CHF	740'000
Frais d'exploitation	CHF/an	30'000
Prix de revient	cts/kWh	33.4
Prix de vente	cts/kWh	28.7
Bénéfice annuel	CHF/an	-12'000

Tableau 5. Caractéristiques techniques et économiques

Conclusions, remarques et suggestions

Malgré l'augmentation du prix de vente due à l'Ordonnance sur l'Energie du 14 mars 2008, la réhabilitation du Moulin de la Palaz reste un projet difficilement rentable.

Cette seconde étude montre que le canal d'amenée limite le débit à $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$, atteint ou dépassé plus de 215 jours/an, alors que le débit atteint ou dépassé plus de 60 jours est de $6 \text{ m}^3/\text{s}$. A ce stade du projet, seuls des travaux de génie civil minimaux ont été considérés: ainsi aucun renforcement des berges n'est prévu, ce qui implique des coûts de maintenance plus ou moins importants, aucune analyse des berges n'ayant été effectuée.

Une autre problématique, non moins négligeable, est celle de l'emprise du turbogroupe sur la zone locative, en ce sens qu'il sera placé devant la maison, condamnant notamment une fenêtre et impliquant d'éventuels désagréments aux locataires (bruit, vibrations, ...). Une autre implantation de la turbine conduirait à augmenter les coûts de génie civil et vouerait le projet à l'échec.

Compte tenu de la précision du devis de $\pm 30 \%$, ce projet est à considérer comme à la limite de la rentabilité.

Annexes

Annexe 1: Plan de situation du moulin de la Palaz (plan n°06C54-100, RWB SA, mars 2007)

Annexe 2: Plan de situation, coupe du moulin de la Palaz et intégration de la turbine (plan n°06C54-101-A, RWB SA, mars 2007)



Annexe 3: Profil en long de la concession (dossier de concession SESA)

Annexe 4: Carte des bassins versants de la Venoge (SESA)

Annexe 5: Croquis d'encombrement de la turbine à chambre d'eau (croquis n°Ma0625-0001-3A, MHyLab, avril 2008)

Annexe 6: Devis des travaux de génie civil (RWB, avril 2008)

Annexe 7: Raccordement électrique: description, plan et devis (Romande Energie, avril 2008)

