



RÉHABILITATION DE LA PETITE CENTRALE DE LA CHOCOLATIÈRE (ECHANDENS – BUSSIGNY)

ETUDE DE FAISABILITÉ

Rapport final

Auteurs

MHyLab

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

Conus et Bignens SA

Montagibert 18, 1005 Lausanne, admin@conus-bignens.ch

Ecole d'ingénieurs de Lullier

150, Rte de Pressinge, 1254 Jussy



Date: 07.05.08

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: 102051

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



Table des matières

Résumé	5
Introduction	6
Situation	6
Données de base	8
Hydrologie et courbe des débits classés	8
Canal d'aménée: calculs hydrauliques	9
Méthodes utilisées	9
Etat actuel du canal	10
Gabarit hydraulique et lignes d'eau dans l'état du projet	12
Perte de charge	12
Canal de fuite: calculs hydrauliques	13
Méthodes utilisées	13
Etat actuel du canal	13
Niveau d'eau aval	14
Dénivellation et énergie hydraulique brute	15
Chute nette et énergie hydraulique nette	16
Principales dimensions de la turbine	17
Calcul de la production	17
Calculs économiques comparatifs des variantes	19
Investissements	19
Investissement en électromécanique	19
Investissement en génie civil	20
Frais d'exploitation	21
Prix de vente	22
Prix de revient	22
Principales caractéristiques des variantes	23
Equipements hydro-mécaniques	24
Principe de fonctionnement de l'installation de turbinage	24
Turbine	25
Génératrice	26
Vannes, batardeaux et grilles de l'installation	26
Contrôle commande	26
Dispositif de sécurité	27
Raccordement électrique	27
Travaux d'aménagement du site	27
Seuil et échelle à poissons	27
Prise d'eau et vanne du canal	29



Canal d'amenée et aménagement des berges.....	29
Géotextile biodégradable	29
Ensemencement	29
Digue «renforcée» et fascine d'hélophytes.....	30
Tressage de saule.....	31
Saules têtards	31
Intégration des turbines au site.....	32
Canal de fuite.....	32
Conclusions, remarques et suggestions	33
Annexes.....	34



Résumé

Située sur la Venoge, sur les communes d'Echandens et de Bussigny, la petite centrale de la Chocolatière bénéficie depuis 1951 d'un droit d'eau qui précise un débit maximal de 3 m³/s. Compte tenu de la courbe des débits classés, un débit d'équipement de 6 m³/s est envisageable, qui implique, vu les canaux existants, de rehausser le seuil.

Ainsi, deux variantes sont ici analysées: l'une d'un débit conforme à la concession, l'autre en demandant la négociation en vue de rehausser le seuil de 35 cm et de turbiner un débit maximal de 6 m³/s.

Avec une chute disponible pour le turbinage de l'ordre des 4 mètres, le doublement du débit maximal se traduit l'installation d'une deuxième turbine en chambre d'eau et par une production multipliée par 1.3, atteignant 727'000 kWh/an, la puissance électrique maximale étant de 177 kW.

En terme de prix de revient, la variante à 6 m³/s est plus intéressante avec 23.9 cts/kWh contre 25.9 cts/kWh, ce qui correspond, malgré un prix de vente pour la variante à 3 m³/s supérieur de 2.3 cts/kWh/ (respectivement 28.4 et 26.1 cts/kWh selon l'Ordonnance sur l'Energie de mars 2008), par un bénéfice annuel en faveur de l'augmentation du débit turbiné et du rehaussement du seuil.



Introduction

Dans le cadre du plan annuel 2007 du Programme Petites Centrales Hydrauliques de Suisse Energie, le bureau Crausaz-Consultant, le bureau d'ingénieurs Conus et Bignens SA, L'Ecole d'Ingénieurs de Lullier (EIL) et MHyLab ont été mandatés par Romande Energie Renouvelable SA (RER) et ITC SA pour effectuer une étude de faisabilité détaillée de la réhabilitation de la petite centrale de la Chocolatière sur les communes d'Echandens et de Bussigny (canton de Vaud).

Cette étude complète celle, sommaire, effectuée en mars 2005, qui a démontré la préfaisabilité technique et économique du projet.

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

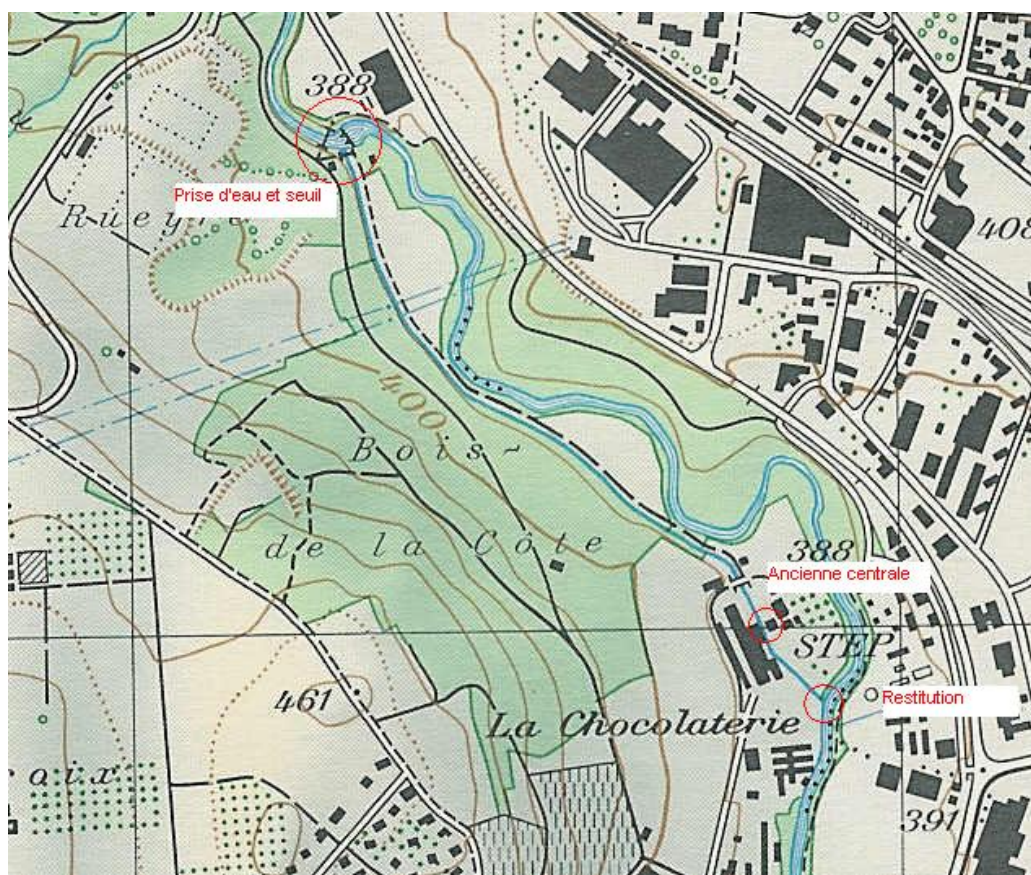


Figure 1. Plan du site de la Chocolatière sur la Venoge, communes d'Echandens et de Bussigny

Le site, datant du XVIII^{ème} siècle¹, sur la Venoge, comprend actuellement les équipements suivants:

- Un seuil, partiellement emporté par une crue en 2001 (voir Photo 1)
- Une prise d'eau (531 290/155 625) en mauvais état (photo en page de garde et Photo 1), équipée d'une vanne de garde,
- Un canal d'amenée de 847 m de type naturel (voir Photo 2), excepté à l'arrivée dans le bâtiment, où il est bétonné,

¹ Se reporter au rapport de mars 2005 pour l'historique du site



- L'ancienne centrale (531 810/155 000) (voir Photo 3)
- Un canal de fuite de 91 m de longueur de type partiellement naturel, qui restitue l'eau à la Venoge aux coordonnées 531 900/154 915, (voir Photo 4).



Photo 1. Seuil et passe à poissons sur la Venoge



Photo 2. Canal d'amenée



Photo 3. Entrée de l'ancienne centrale



Photo 4. canal de fuite

Le site de la Chocolatière bénéficie, depuis 1951, d'un droit d'eau perpétuel (502/166) et d'une concession qui précise:

- Un débit maximal dérivé de $3 \text{ m}^3/\text{s}$,
- Une chute maximale de 5.94 m, définie comme la différence entre:
 - Le couronnement du barrage à 388.69 m,
 - La restitution à la Venoge à 382.75 m (altitude du fond du lit du canal de fuite).

Cette chute n'est pas entièrement exploitable étant donné la perte de charge dans les canaux d'amenée et de fuite.

L'objectif du projet est d'étudier la faisabilité technique et économique du site:

- selon le droit d'eau: variante A,
- en considérant une extension de ce droit d'eau: variante B.



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 et courbe des débits classés

Les données de débits disponibles sont particulièrement complètes et précises puisqu'une station hydrologique de l'Office Fédéral de l'Environnement, située à moins de 2 km en aval du seuil (station d'Ecublens – Les Bois : 532 040/154 160), fournit des relevés depuis 1979. La différence de superficie des bassins versants partiels au droit de la station de mesure et de la prise d'eau étant négligeable et le tronçon de la Venoge correspondant ne comportant pas d'affluent notable, la courbe des débits classés moyens de la période 1979 – 2006 sera utilisée telle quelle.

Les débits classés pour les années 1979-2006 donnent un Q₃₄₇ de 0.55 m³/s, ce qui correspond, selon la Loi sur la Protection des Eaux à un débit résiduel de:

$$Q_r = 0.280 + \frac{Q_{347} - 0.500}{0.100} \cdot 0.031 = 0.296 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Toutefois, c'est un **débit résiduel de 0.400 m³/s** qui sera considéré ici, compte tenu du PAC Venoge.

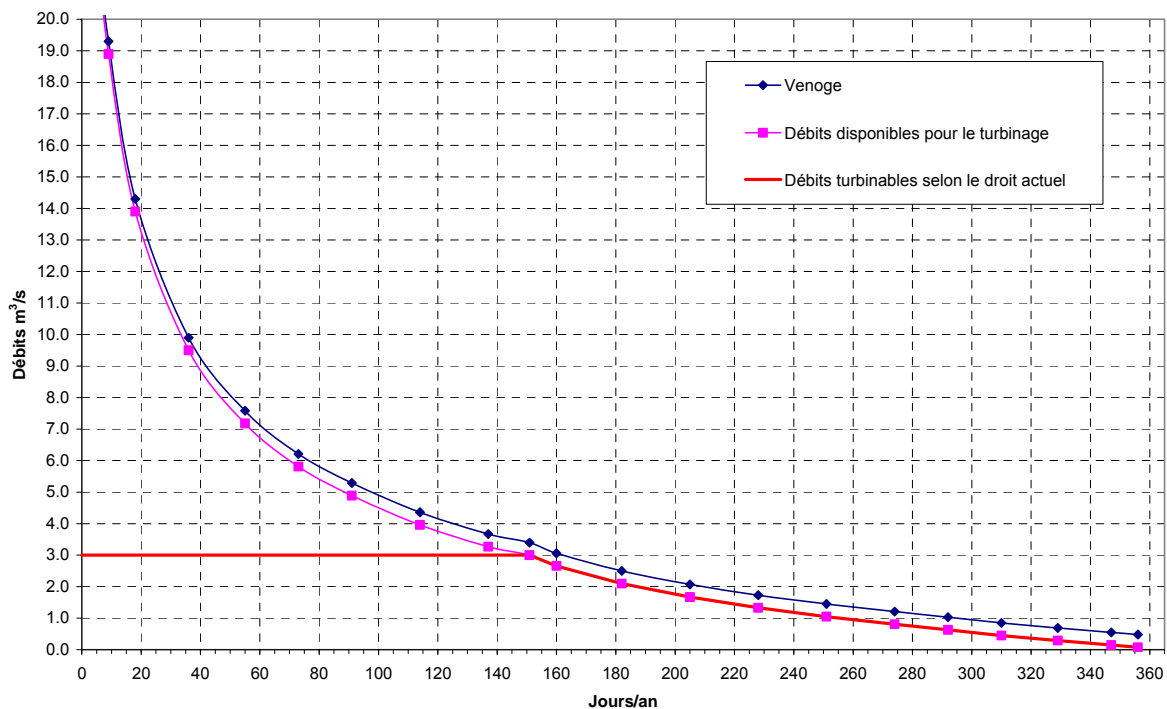


Figure 2. Courbe des débits classés pour le site de la Chocolatière

Le débit maximal concédé de 3 m³/s est atteint ou dépassé plus de 150 jours par an. Le débit d'équipement d'une installation optimale étant atteint ou dépassé 60 à 80 jours par an, nous considérerons, pour la variante B, un débit maximal de 6 m³/s.

Deux variantes de débits d'équipement seront donc considérées dans cette étude:

- **Variante A: Q_N = 3 m³/s**, conformément au droit d'eau,



- **Variante B: $Q_N = 6 \text{ m}^3/\text{s}$** , impliquant une négociation du droit d'eau.

Canal d'amenée: calculs hydrauliques

MÉTHODES UTILISÉES

Les simulations hydrauliques des canaux d'amenée et de fuite ont été réalisées par la filière Gestion de la Nature de l'Ecole d'ingénieurs HES de Lullier. Le but de ces calculs est de déterminer le gabarit hydraulique et la pente des canaux, qui permettent, compte tenu de la topographie, d'alimenter au mieux la turbine selon des critères de vitesse d'écoulement et de perte de charge. La géométrie proposée tient compte des aménagements requis pour la protection des berges.

Les simulations hydrauliques ont été exécutées avec le programme numérique HEC-RAS. Cet outil permet de modéliser les écoulements à surface libre des canaux ainsi que des cours d'eau naturels. Pour le présent projet de réhabilitation des canaux, des conditions d'écoulement stationnaire ont pu être admises. Cette approche permet une vérification du comportement hydraulique des canaux, pour un débit constant. Étudier les variations rapides du débit au long du canal, qui aurait nécessité des calculs dits non stationnaires, n'apporterait rien de plus dans le cas présent.

La ligne d'eau par HEC-RAS est calculée avec ladite Standard Step Method, qui résout l'équation d'énergie (selon Bernoulli) par itération entre les coupes transversales qui composent le modèle du canal, définies par l'ingénieur hydraulicien. La rugosité du canal est définie à chaque coupe. Celle-ci est subdivisée, en vue d'attribuer un coefficient de rugosité selon Manning à chaque subdivision.

Les deux variantes de débit d'équipement sont considérées pour la détermination des lignes d'eau du canal d'amenée:

- La variante A impose un niveau amont constant, à 388.69 ms.m. ce qui correspond à la crête du seuil comme défini dans le droit d'eau. La pente des lignes d'eau évolue au gré du débit, de la rugosité du canal et de son gabarit hydraulique disponible.
- La variante B consiste à calculer la ligne d'eau correspondant au débit de $6 \text{ m}^3/\text{s}$, en conservant le même gabarit de canal. De manière à obtenir une énergie massique à disposition de la turbine au moins égale à celle de la variante à $3 \text{ m}^3/\text{s}$, le calcul permettra en outre de proposer une nouvelle valeur de crête du seuil.



ETAT ACTUEL DU CANAL

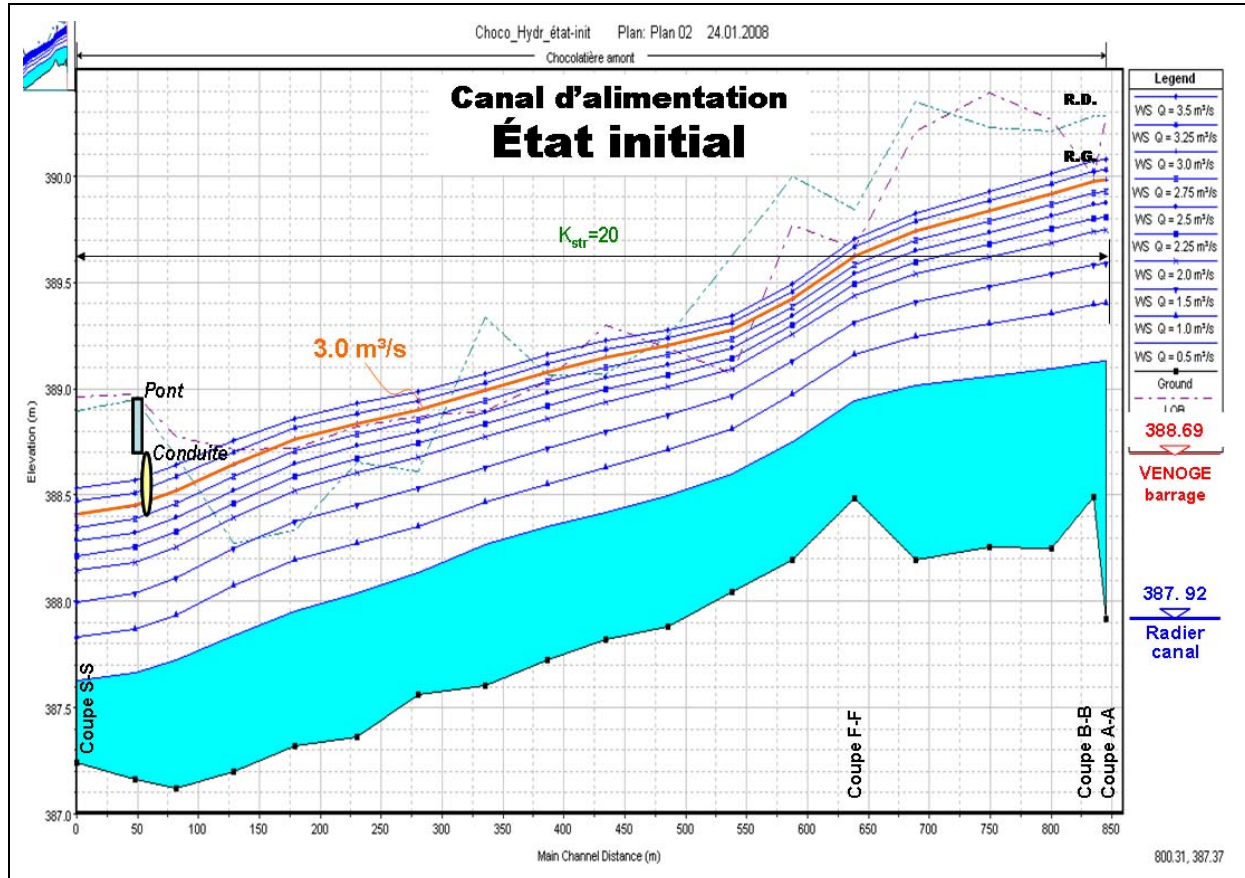


Figure 3. Profil en long hydraulique du canal d'amenée à l'état initial

La Figure 3 montre le profil en long hydraulique du canal d'amenée dans son état actuel, avant sa réhabilitation. Le Carnet n°CHOC-0807-2 (voir Annexe 5) regroupe les coupes de ce canal à l'état initial, à des profils kilométriques représentatifs, au droit de la prise d'eau (Coupe A-A), une dizaine de mètres plus en aval (Coupe B-B), quelque 200 m plus bas (Coupe F-F) et dans le secteur amont immédiat de la centrale (Coupe S-S).

En observant la ligne de fond du canal dans la Figure 3, on note la présence de dépôts de sédiments importants entre les P.km 600 et 840. Ils se distinguent très nettement par les pointes formées au P.km 638.82 (Coupe F-F) et au P.km 834.72 (Coupe B-B). Dans ces coupes, l'obstruction partielle du gabarit d'écoulement est mise en évidence (voir Carnet de coupes). Ces dépôts sont issus des matériaux érodés du coteau rive droite, puis déversés dans le canal d'amenée par deux ruisseaux. Ces apports particulièrement importants lors d'intempéries semblent s'accroître au fil du temps, conduisant, aujourd'hui, au comblement quasi complet du canal. Les photos prises lors des investigations de terrain, entre le 19 janvier 2007 et le 17 janvier 2008, témoignent de cet état et surtout de son évolution très défavorable (voir Photo 5). On y constate l'incision marquée du lit des ruisseaux.





Photo 5. Ruisseau en rive droite fortement incisé, emportant les matériaux du coteau dans le canal d'amenée. Évolution observée de janvier 2007 à janvier 2008.

Il n'est alors pas surprenant de voir l'eau de ces ruisseaux s'écouler vers l'amont du canal d'amenée (voir Photo 6).



Photo 6. Les dépôts issus des matériaux érodés du coteau obligent l'eau à s'écouler vers l'amont du canal d'amenée

Outre son comblement progressif par les sédiments, le manque d'entretien a conduit à l'envahissement du canal d'amenée par des végétaux et autres feuilles et bois morts. Les quelques reliquats d'une pisciculture abandonnée forment également de nombreux obstacles ponctuels (voir Photo 7).





Photo 7. Canal d'amenée envahi par les végétaux



Photo 8. Obstacle appartenant à une pisciculture abandonnée

Au vu de ce qui précède, on comprend que les simulations mettent en évidence une carence marquée de capacité hydraulique du canal à l'état actuel. Deux conséquences fondamentales doivent être relevées, observables dans la Figure 3. Premièrement, les dépôts de sédiments formés dans la partie amont du canal, ainsi que la rugosité générale importante liée aux végétaux et autres obstacles du canal, obligent la ligne d'eau à s'élever pour tous les débits. Au droit de la prise d'eau, une surélévation d'environ 1.20 m serait nécessaire pour 3.0 m³/s, afin que l'eau s'écoule dans la bonne direction. Deuxièmement, l'effet conjugué du rehaussement des lignes d'eau, avec un écoulement maintenu lent par la forte rugosité du canal, provoque son débordement sur différents tronçons (du P.km 125 au P.km 300 ; du P.km 475 au P.km 560).

Ces observations et résultats de simulations démontrent la nécessité d'un assainissement conséquent du canal d'amenée.

Finalement, l'assainissement du canal d'amenée doit passer par:

- l'élimination des anciens ouvrages devenus obsolètes,
- le curage du fond de canal,
- le talutage, le débroussaillage,
- le recépage et la taille des végétaux,
- puis l'évacuation de tout déchet.

Le Mandant doit être attentif au fait que la maîtrise globale des ruisseaux rive droite, doit être une préoccupation principale, en vue d'éviter de compromettre le bon fonctionnement futur du canal d'amenée et de la turbine, ainsi que de réduire les dépenses d'entretien pendant leur exploitation.

GABARIT HYDRAULIQUE ET LIGNES D'EAU DANS L'ÉTAT DU PROJET

Pour la variante A, le niveau d'eau amont à la prise d'eau est maintenu constant par la régulation de la turbine à la cote de 388.69 m s.m. définie par le seuil de la Venoge. Dicté par la cote dudit seuil, le niveau de mise en charge de la turbine se définit à **388.25 m s.m.** pour le débit nominal de 3.0 m³/s.

De manière à conserver un niveau à la turbine au moins égal à celui de la variante A, le calcul permet de déterminer une hauteur du seuil nécessaire à 389.04 msm pour un niveau d'eau dans le bassin de mise en charge de 389.04 msm. Il ressort donc de cette analyse, que pour la variante B, visant à augmenter le débit de concession à hauteur de 6.0 m³/s, **le seuil de la Venoge devrait être rehaussé de 35 cm.**

PERTE DE CHARGE

La détermination de la perte de charge dans le canal d'amenée se base sur les principes suivants:

- La turbine est régulée de manière à maintenir à la prise d'eau un niveau d'eau constant,



- Lorsque la turbine est à l'arrêt, et donc que le débit transitant dans le canal est nul, la perte de charge dans le canal est nul, et le niveau d'eau en fin de canal d'amenée (ou en amont direct de la turbine) est égal à celui de la crête du seuil,
- Lorsque le débit transitant dans le canal augmente, le niveau d'eau au droit de la turbine diminue vu la perte de charge.
- Le calcul de la perte de charge dans le canal d'amenée, basé sur la formule de Colebrook, utilise l'équation suivante:

$$H_r(Q_t) = K_{Hr} \cdot Q_t^2 \quad [\text{m}]$$

avec: Q_t = débit transitant [m³/s]

$H_r(Q_t)$ = perte de charge au débit transitant [m]

K_{Hr} = coefficient global de perte de charge [s²/m⁵]

Les niveaux d'eau au droit de la turbine, déterminés par l'EIL, sont les suivants:

- Variante A: $Z_1(3 \text{ m}^3/\text{s}) = 388.25 \text{ m}$, soit une perte de charge de 44 cm,
- Variante B: $Z_1(6 \text{ m}^3/\text{s}) = 388.40 \text{ m}$, soit une perte de charge de 64 cm.

Finalement, sont déduites les formules de perte de charge suivantes dans le canal d'amenée:

- Variante A: $H_{rACA}(Q_t) = 0.049 \cdot Q_t^2 \quad [\text{m}]$
- Variante B: $H_{rBCA}(Q_t) = 0.018 \cdot Q_t^2 \quad [\text{m}]$

Canal de fuite: calculs hydrauliques

MÉTHODES UTILISÉES

Les méthodes utilisées sont similaires à celles du canal d'amenée.

Les calculs du comportement hydraulique du canal de fuite, se basent sur l'hypothèse d'un écoulement uniforme en aval du point de restitution dans la Venoge. Le niveau d'eau, déterminé à cette section de contrôle, conditionne la courbe de remous qui s'établit dans ce canal pour les différents débits, et de ce fait, le niveau d'eau au pied de la turbine.

ETAT ACTUEL DU CANAL

La Figure 4 montre le profil en long hydraulique du canal de fuite dans son état actuel, avant sa réhabilitation. L'aplanissement est notable sur sa moitié aval, révélé également par les Coupe V-V et Coupe W-W, montrées dans le Carnet n°CHOC-0807-2 (voir Annexe 5). Cette dernière est située au point de restitution à la Venoge.



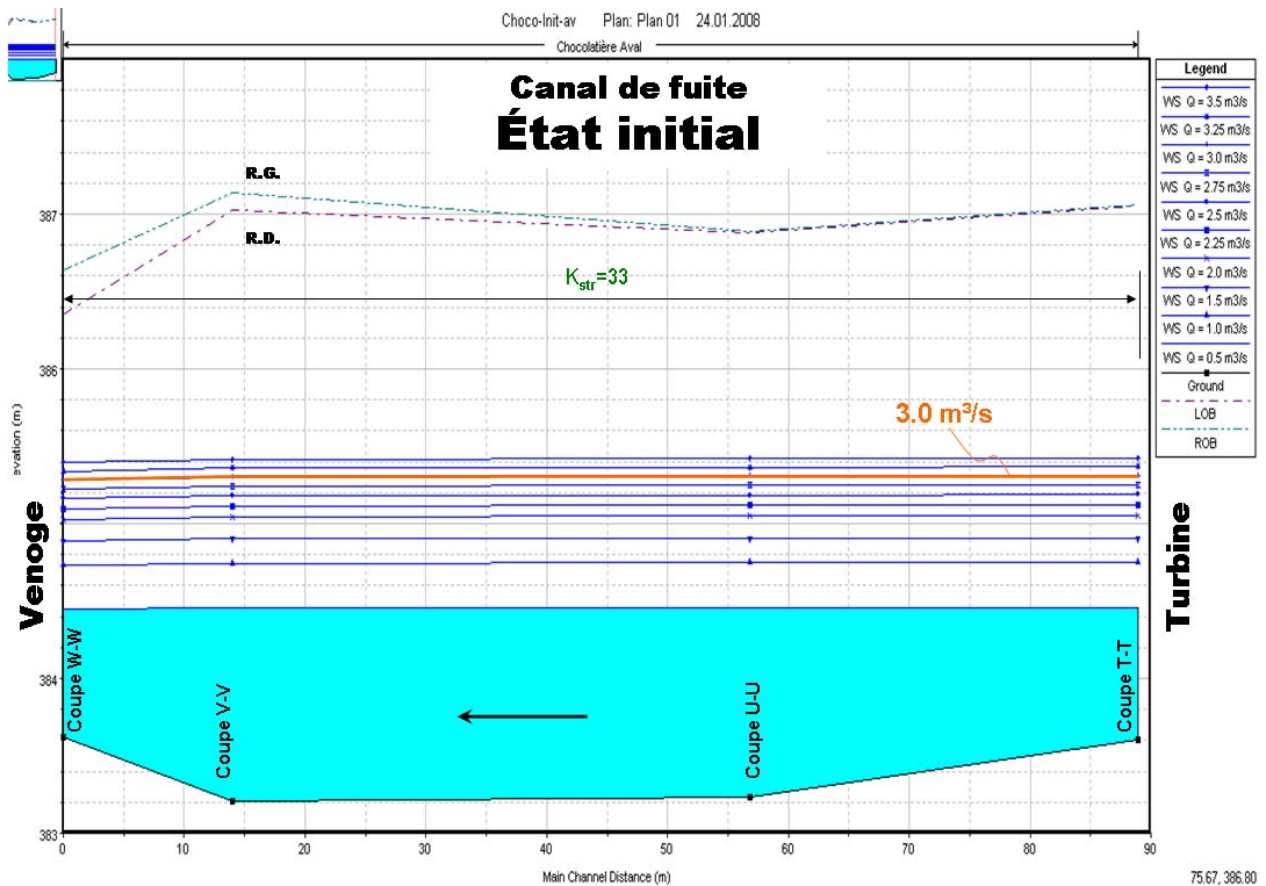


Figure 4. Profil en long hydraulique du canal de fuite (à noter: les dépôts formés à la restitution - Coupe W-W)

Les travaux de remise en état du canal de fuite sont décrits à la page 32.

NIVEAU D'EAU AVAL

La concession précise un niveau du fond de lit à 382.75 m, ce qui est proche de la valeur actuelle de 382.83 m s.m. au niveau du local de turbinage.

Compte tenu du manque d'informations sur l'évolution des niveaux de la Venoge en fonction de son débit au point de restitution, les niveaux d'eau dans le canal de fuite ont été déterminés par l'EIL sur des hypothèses pessimistes.

Les niveaux d'eau en début de canal de fuite et à la restitution, déterminés par l'EIL, sont les suivants:

Variante		A	B
Débit transitant	m ³ /s	3.0	6.0
Niveau d'eau en début de canal de fuite (ou à la sortie de la turbine)	m	383.66	384.35
Niveau d'eau à la restitution	m	383.61	384.30
Perte de charge	m	0.05	0.05

Tableau 1. Niveaux d'eau dans le canal de fuite

Le niveau d'eau aval sera, à ce stade de l'étude, considéré comme indépendant des débits de la Venoge, soit variant uniquement en fonction du débit transitant dans les canaux.



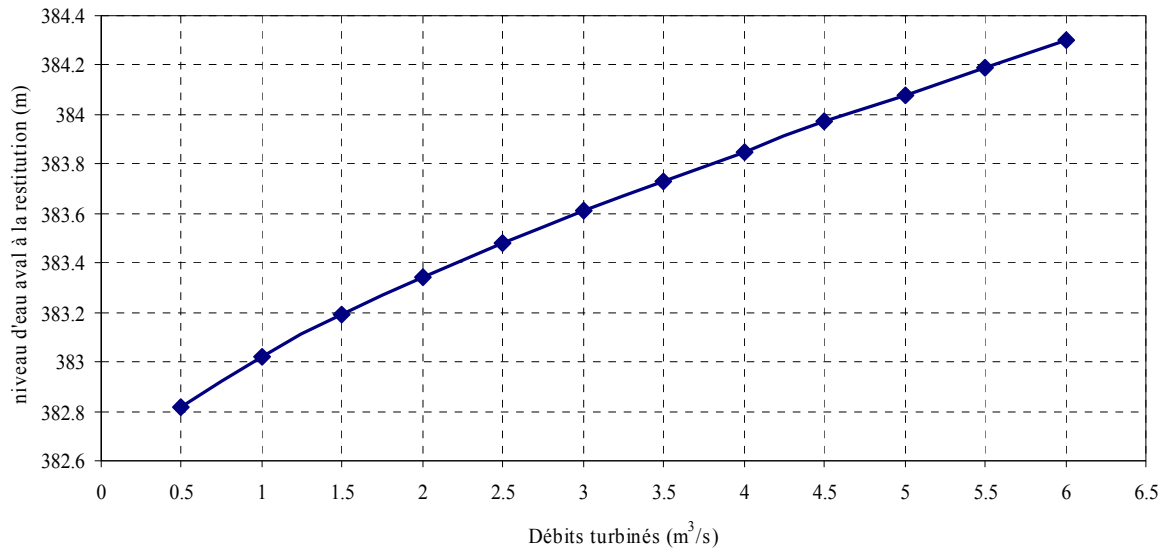


Figure 5. Niveau d'eau aval en fonction des débits turbinés à la restitution à la Venoge (niveau du radier: 382.46 m s.m.)

La perte de charge dans le canal de fuite est estimée de manière similaire au canal d'amenée.

Finalement, on en déduit les formules de perte de charge suivantes dans le canal de fuite:

- Variante A: $H_{rACF}(Q_t) = 0.006 \cdot Q_t^2$ [m]
- Variante B: $H_{rBCF}(Q_t) = 0.001 \cdot Q_t^2$ [m]

Dénivellation et énergie hydraulique brute

La dénivellation disponible est définie par:

- Le niveau de la crête du barrage, sur lequel seront régulés les turbogroupes, soit 388.69 m pour la variante A et 389.04 m pour la variante B,
- Le niveau d'eau à la restitution à la Venoge, soit, au débit d'équipement, 383.61 m pour la variante A, et 384.30 m pour la variante B.

Ainsi, l'éventuelle lame d'eau à la crête du seuil n'est pas prise en compte, de même que la variation du niveau d'eau aval en fonction des débits de la Venoge.

Finalement, au débit d'équipement, la dénivellation est de

- 5.08 m pour la variante A,
- 4.75 m pour la variante B.

La puissance hydraulique brute maximale (sans prendre en compte la perte de charge dans les canaux, ni les rendements de la turbine et de l'alternateur) est de:

- 149 kW pour la variante A,
- 279 kW pour la variante B.

En considérant la courbe des débits classés turbinables, l'énergie hydraulique brute disponible est de:

- 837'000 kWh/an pour la variante A,



- 1'194'000 kWh/an pour la variante B.

Ainsi, le doublement du débit d'équipement et le rehaussement du seuil de 35 cm conduit à multiplier l'énergie hydraulique brute du site par 1.4.

Chute nette et énergie hydraulique nette

Suivant les calculs exposés aux chapitres précédents, la perte de charge dans les canaux est définie par:

$$\text{➤ Variante A: } H_{rAC}(Q_t) = 0.055 \cdot Q_t^2 \quad [\text{m}]$$

$$\text{➤ Variante B: } H_{rBC}(Q_t) = 0.019 \cdot Q_t^2 \quad [\text{m}]$$

Au débit d'équipement, la perte de charge est donc:

- Variante A: 0.49 m, soit près de 10 % de la dénivellation,
- Variante B: 0.69 m, soit près de 14 % de la dénivellation.

En considérant une vitesse maximale de 2 m/s à la sortie du diffuseur au débit nominal de la machine, la chute nette ressort de l'expression suivante:

$$H(Q_T) = \Delta Z(Q_T) - \left(v \cdot \frac{\frac{Q_t}{Z_T}}{\frac{Q_{\max}}{Z_{T\max}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2g} \quad [\text{m}]$$

Avec:

$H(Q_T)$: chute nette au débit turbiné total	[m]
Q_T : débit turbiné total	[m ³ /s]
$\Delta Z(Q_T)$: dénivellation au débit turbiné total	[m]
v : vitesse en sortie d'aspirateur au débit maximal de la turbine, soit 2	[m/s]
Q_{\max} : débit maximum de l'installation, soit 3.0 pour la variante A, et 6 pour la variante B	[m ³ /s]
$Z_{T\max}$: nombre de turbines installées, soit 1 pour la variante A, et 2 pour la variante B	[-]
Z_T : nombre de turbines en service	[-]

La perte cinétique dans l'aspirateur représente alors un maximum de 0.20 m au débit d'équipement de l'installation.

La puissance hydraulique nette maximale prenant en compte la perte de charge et la perte cinétique est de:

- 129 kW pour la variante A,
- 227 kW pour la variante B.

En considérant la courbe des débits classés turbinables, l'énergie hydraulique nette disponible est de:

- 729'000 kWh/an pour la variante A,
- 971'000 kWh/an pour la variante B.

Ainsi, 108'000 kWh/an pour la variante A et 223'000 kWh/an pour la variante B sont perdus dans l'infrastructure.



Principales dimensions de la turbine

La dénivellation et les variations de débits imposent l'implantation de turbines Kaplan en chambre d'eau, à axe vertical, à 4 pales réglables, et à distributeur fixe. La variante B implique l'installation de deux turbines identiques, chacune dimensionnée pour un débit maximum de 3 m³/s. Le diamètre externe de roue est calculé à 1.16 m pour chacune de ces turbines, résultat d'un compromis entre la répartition des rendements en fonction des débits turbinés et de l'encombrement de la machine.

Le Tableau 11 présente les principales caractéristiques des turbines pour chaque variante, tandis que l'Annexe 11 donne le croquis d'encombrement de la variante B.

Il est à noter que la turbine est dimensionnée pour la chute nette correspondant au débit d'équipement de 3 m³/s dans les deux cas de figure. Ainsi, la détermination de la perte de charge dans les canaux a une influence importante sur les performances de la machine.

Calcul de la production

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

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

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

Le rendement de la turbine pour chacune des variantes est donné à la Figure 6.

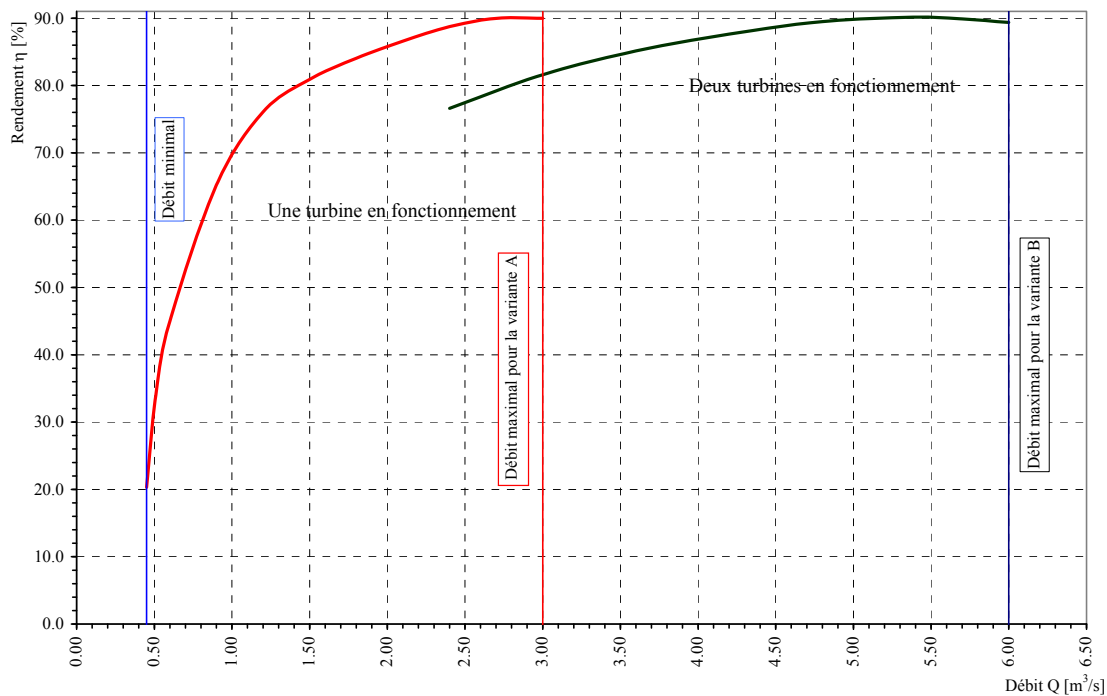


Figure 6. Rendement turbine pour les deux variantes

Le rendement des paliers est fixé à 99 % quel que soit le débit turbiné.



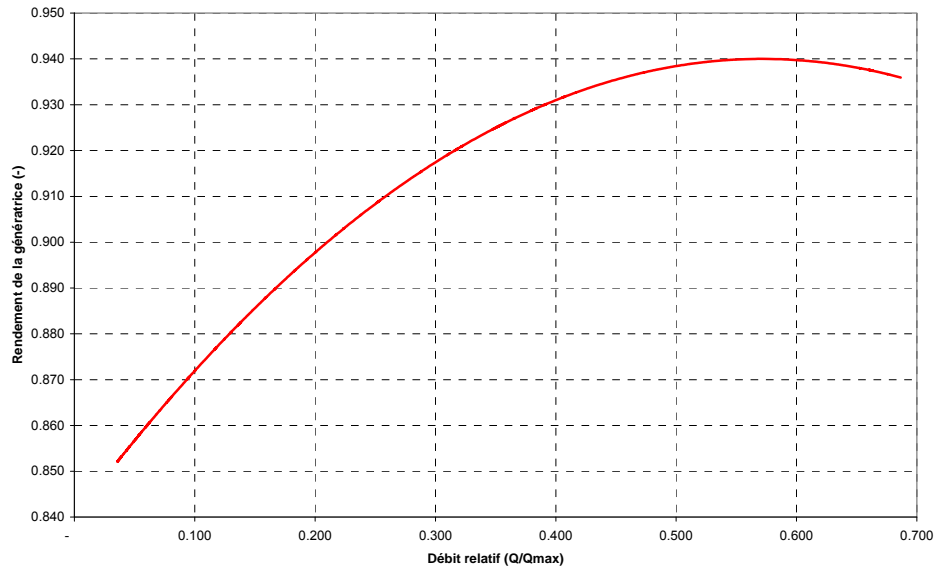


Figure 7. Courbe- type de rendement de la génératrice

Le rendement du multiplicateur de vitesse est fixé à 95 % quel que soit le débit turbiné.

Le rendement de l'alternateur, présenté à la Figure 7, est fonction du débit turbiné par rapport au débit nominal.

La Figure 8 présente les courbes des puissances classées pour les deux variantes, tandis que le Tableau 11 présente les puissances et les productions pour chaque variante.

La puissance électrique maximale est de:

- 101 kW pour la variante A,
- 177 kW pour la variante B.

En considérant la courbe des débits classés turbinables, la production électrique est de:

- 543'000 kWh/an pour la variante A,
- 727'000 kWh/an pour la variante B.

Ainsi, le doublement du débit d'équipement et le rehaussement du seuil de 35 cm conduit à multiplier la production électrique du site par 1.3.



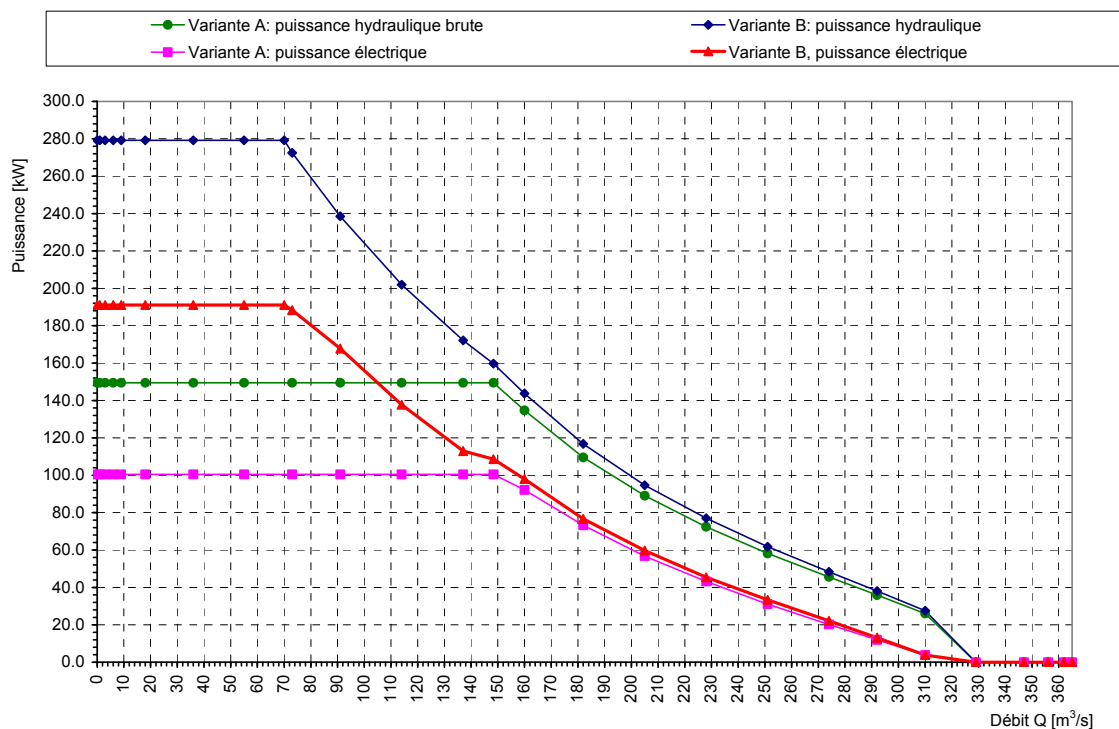


Figure 8. Courbes des puissances classées

Calculs économiques comparatifs des variantes

Cette étude économique a pour but d'approcher le prix de revient du kWh électrique à **plus ou moins 20%**.

INVESTISSEMENTS

Tous les coûts sont donnés hors taxe.

Les frais d'ingénierie, les divers et imprévus sont estimés à **20 %** de l'investissement.

Investissement en électromécanique

Le coût des turbines est estimé à partir des données statistiques dont dispose MHyLab à **350'000 CHF, pour la variante A, et à 600'000 CHF pour la variante B.**

Le coût des vannes, grilles et dégrilleurs est estimé à partir des données statistiques dont dispose MHyLab à **50'000 CHF** pour les deux variantes.

Les coûts de raccordement électrique ont été estimés par Romande Energie et sont présentés dans le tableau suivant, avec indication des tronçons concernés selon les schémas de l'Annexe 14.

Variantes	A	B
Panier à câbles - 30 m- A-B	10'000	10'000
Fouille en chaussée - 25 m - B-C	9'000	9'000
Fouille en pied de talus - 90 m- C-D	6'000	6'000
Ceander A-D	9'000	14'000
Tube PE 120/132 - 115 m - C-D	1'000	1'000
Total	35'000	40'000

Tableau 2. Récapitulatif des coûts pour le raccordement électrique (CHF) - Annexe 14-

La différence de coût entre les deux variantes est due aux puissances électriques, la variante B de-



mandant une section de câble plus grande.

Investissement en génie civil

En génie civil, les coûts sont similaires pour les deux variantes, à l'exception des coûts pour la zone de turbinage.

Les coûts d'aménagement du **seuil** et de réalisation de la **passerelle à poissons** ont été estimés par le bureau Conus et Bignens et sont détaillés à l'Annexe 3.

Installation	42'000
1 ^{ère} étape – seuil en rive droite	127'000
2 ^{ème} étape – digue rive droite	66'000
3 ^{ème} étape – digue en rive gauche et échelle à poissons	191'000
4 ^{ème} étape – seuil en rive gauche	106'000
5 ^{ème} étape – échelle à poissons en rive gauche	46'000
6 ^{ème} étape – échelle à poissons en rive droite	51'000
Régie	5'000
Total pour le seuil et la passerelle à poissons	634'000

Tableau 3. Récapitulatif des coûts pour le seuil et la passerelle à poissons selon les étapes de construction (CHF) -Annexe 3 -

Les coûts de restauration du **canal d'amenée** ont été estimés par l'EIL et sont détaillés à l'Annexe 8.

Travaux préparatoires	23'000
Terrassements	62'000
Transports	61'000
Fourniture des matériaux et végétaux	30'000
Mise en place des matériaux et végétaux	32'000
Total canal d'amenée	208'000

Tableau 4. Récapitulatif des coûts pour la restauration du canal d'amenée (CHF) - Annexe 8 -

Les coûts **d'intégration des turbines à l'infrastructure** pour la variante B ont été estimés par le bureau Conus & Bignens SA et sont détaillés à l'Annexe 13.

Installation complémentaire de chantier	20'000
Démolition et terrassements	122'000
Reconstruction	262'000
Total intégration des turbines au site – variante B	404'000

Tableau 5. Récapitulatif des coûts pour la remise en état de la zone de turbinage – variante B - (CHF) - Annexe 13 -

Pour la variante A, une déduction de CHF 78'000.- est à appliquer au total de CHF 404'000.-

Les coûts de restauration du **canal de fuite** ont été estimés par le bureau Conus & Bignens SA et sont détaillés à l'Annexe 9.



Travaux forestiers	3'000
Dégagement du lit	5'000
Chargement, transport et mise en décharge	15'000
Apport de moellons sur les lieux de réfection	3'000
Reconstruction de moellonnages	7'000
Total canal de fuite	33'000

Tableau 6. Récapitulatif des coûts pour la restauration du canal de fuite (CHF) - Annexe 9 –

Lors de la séance organisée, le 15 octobre 2004, entre le SESA, les communes d'Echandens et de Bussigny, le Bureau Conus et Bignens et le mandant, une clé de répartition financière pour la protection des berges, la passe piscicole et le barrage, avait été proposée par le SESA sur la base de la Loi vaudoise sur la police des eaux dépendant du domaine public (LVPol). Cette clé de répartition se basait alors sur un coût prévisionnel de CHF 500'000.-, comme présenté dans le Tableau 8.

	%	CHF
Vaud	60	300'000
Commune de Bussigny	6.7	33'333
Commune d'Echandens	3.3	16'667
Privé	20	100'000
Confédération	10	50'000
Coût prévisionnel (15.10.04)	100	500'000

Tableau 7. Clé de répartition proposée par le SESA et coûts prévisionnels au 15.10.04

Ainsi, **20 %** de l'investissement dû au seuil et à la passe à poissons revient au mandant. C'est sur cette base que seront effectués les calculs de rentabilité du projet.

Variantes	A		B	
	Coûts totaux	Avec clef de répartition	Coûts totaux	Avec clef de répartition
Seuil et passe à poissons	634'000	127'000	634'000	127'000
Canal d'aménée	208'000	208'000	208'000	208'000
Intégration des turbines au site	326'000	326'000	404'000	404'000
Canal de fuite	33'000	33'000	33'000	33'000
Total génie civil	1'201'000	694'000	1'279'000	772'000

Tableau 8. Récapitulatif des coûts de génie civil (CHF) pour les deux variantes, en prenant en compte la clef de répartition (20% pour le mandant)

FRAIS D'EXPLOITATION

Les frais d'exploitation sont estimés à partir d'installations similaires, soit une moyenne de **40'000 CHF/an pour la variante A, et à 45'000 CHF/an pour la variante B**. Ils comprennent:

- les frais d'assurance,
- les coûts de maintenance, d'entretien courant de la prise d'eau, des canaux, de l'installation de turbinage,
- la consommation d'énergie.



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 10'000.-.

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.-.

PRIX DE VENTE

Cette centrale réhabilitée pourra bénéficier du prix de vente défini par l'Ordonnance sur l'Energie du 14 mars 2008 (OEne), dont le calcul, pour chaque variante, est présenté dans le Tableau 9.

Variante		A	B
Dénivellation	m	5.08	4.75
Production électrique	kWh/an	543'000	727'000
Part du GC dans l'investissement total	%	49	43
Puissance équivalente	kW	62	83
Rétribution de base par classe de puissance	cts/kWh	19.9	18.5
Bonus de pression	cts/kWh	4.5	4.5
Bonus d'aménagement	cts/kWh	3.9	2.9
Prix de vente final	cts/kWh	28.3	25.9

Tableau 9. Calcul du prix de vente l'Ordonnance sur l'Energie du 14 mars 2008

Le prix de vente de la variante A est supérieur de 2.4 cts/kWh, cette variante étant de plus faible puissance, et correspondant à une part de l'investissement en génie civil plus importante, le coût de l'électromécanique étant moindre.

Il est à noter que la part de l'investissement en génie civil par rapport à l'investissement total utilise la clef de répartition.

PRIX DE REVIENT

Le prix de revient est calculé sur les bases suivantes:

- La totalité de l'investissement provient soit d'un emprunt bancaire, soit de capitaux propres rémunérés au même taux,
- Le remboursement de l'emprunt se base sur des annuités constantes,
- Le **taux d'intérêt** considéré dans cette étude est de **5 %**, taux recommandé par l'OEne, et que l'on peut considérer comme prudent sur le moyen terme,
- La **durée d'amortissement** est de 25 ans, comme spécifié dans l'Ordonnance sur l'Energie,
- Les frais d'exploitation et de maintenance sont inclus,
- Le prix de vente est propre à chaque variante, comme explicité à la page 22.



Variante		A	B
Electromécanique	CHF	435'000	690'000
Contrôle commande	CHF	50'000	50'000
Génie civil à charge du propriétaire	CHF	694'000	772'000
Frais d'ingénierie, divers et imprévus	CHF	240'000	300'000
Investissement total	CHF	1'419'000	1'812'000
Frais d'exploitation standard	CHF/an	40'000	45'000
Production annuelle	kWhe/an	543'000	727'000
Prix de vente	cts/kWh	28.4	26.1
Chiffre d'affaire brut	CHF/an	154'000	190'000
Taux d'intérêt	%	5.0	5.0
Durée d'amortissement Génie civil	ans	25	25
Coefficient d'annuité pondéré	%	7.10	7.10
Annuité	CHF/an	101'000	123'000
Bénéfice annuel	CHF/an	13'000	15'000
Prix de revient	cts/kWh	25.9	23.9

Tableau 10. Calculs économiques pour chaque variante

Finalement, compte tenu de la différence de 2.3 cts/kWh entre les deux variantes, la **variante B** permet un **bénéfice annuel supérieur de 2'000.- CHF/an**, pour un prix de revient inférieur de 2.0 cts/kWh. C'est donc cette variante qui est **retenue** dans la suite de l'étude.

Principales caractéristiques des variantes

Variante		A	B
Débit maximal de l'installation	Q_{\max} (m ³ /s)	3.000	6.000
Débit résiduel	Q_r (m ³ /s)	0.400	0.400
Crête du seuil	Z_0 (m s.m.)	388.69	389.04
Niveau d'eau aval à $Q_{\max} + Q_r$ (restitution)	Z_2 (m s.m.)	383.61	384.30
Dénivellation brute	ΔZ (m)	5.08	4.75
Coefficient de perte de charge dans le canal d'aménée	KH_{rCA} (s ² /m ⁵)	0.049	0.018
Niveau d'eau amont au droit de la turbine à $Q_{\max} + Q_r$	Z_1 (m s.m.)	388.25	388.40
Coefficient de perte de charge dans le canal de fuite	KH_{rCF} (s ² /m ⁵)	0.006	0.001
Niveau d'eau aval au droit de la turbine à $Q_{\max} + Q_r$	Z_{1-2} (m s.m.)	383.66	384.34
Chute nette maximale à $Q_{\max} + Q_r$	H_n (m)	4.39	3.85
Type de turbine		axiale à pales réglables, distributeur fixe	
Nombre de pales	(-)	4	4
Nombre de Turbines	Z_T (-)	1	2
Débit d'équipement de la turbine	Q_{\max} (m ³ /s)	3.00	3.00



Débit minimal	Q_{\min} (m ³ /s)	0.45	0.45
Energie massique à Q max	g H (J/kg)	4387	3851
Ouverture du distributeur fixe	(°)	40	40
Hauteur d'aspiration maximale	H _s (m)	> 5.0	> 5.0
Diamètre externe de la roue	D _e (mm)	1160	1160
Vitesse de rotation	N' (t/min)	240	230
Puissance hydraulique brute	P _h (kW)	149	279
Puissance hydraulique nette	P _{hn} (kW)	129	227
Rendement maximal de la turbine	%	90.2	90.0
Rendement des paliers	%	99.0	99.0
Puissance mécanique maximale	P _m (kW)	116	203
Rendement du multiplicateur de vitesse	%	95.0	95.0
Rendement maximal de l'alternateur	%	93.1	93.1
Puissance électrique maximale	P_e (kW)	101	177
Energie hydraulique brute	E _h (kWh/an)	837'000	1'194'000
Energie hydraulique nette	E _{hn} (kWh/an)	729'000	971'000
Production électrique	E_e (kWh/an)	543'000	727'000
Rendement de l'installation	%	65	61
Prix de vente	cts /kWh	28.4	26.1
Frais d'exploitation	CHF/an	40'000	45'000
Investissement total à la charge du propriétaire	CHF	1'419'000	1'812'000
Prix de revient	cts /kWh	25.9	23.9

Tableau 11. Principales caractéristiques des variantes A et B

Equipements hydro-mécaniques

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'INSTALLATION DE TURBINAGE

La régulation de la turbine sera asservie à la mesure de niveau amont effectuée à la retenue (prise d'eau). Le fonctionnement prévu de l'installation est le suivant :

- Tant que le niveau d'eau à la prise d'eau est inférieur au niveau de consigne, la turbine est à l'arrêt.
- Lorsque le niveau d'eau atteint celui de consigne, la turbine démarre.
- Le niveau d'eau à la prise d'eau est maintenu constant par la manœuvre de l'organe de réglage du débit de la turbine (pales de la roue motrice en l'occurrence):
 - Lorsque le niveau d'eau tend à augmenter, la turbine s'ouvre,
 - Lorsque le niveau d'eau tend à baisser, la turbine se ferme.



- Dès que le niveau d'eau dépasse celui correspondant au débit maximum de la turbine, la turbine fonctionne à son débit maximum et le surplus est déversé au niveau du seuil.

En cas d'arrêt de la turbine pour révision, l'eau est déversée au niveau du seuil.

TURBINE

Les indications issues des travaux MHyLab sont fournies à titre indicatif et peuvent varier en fonction du constructeur choisi. En effet, 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.

L'Annexe 11 présente le croquis d'encombrement des turbines, voir Figure 9.

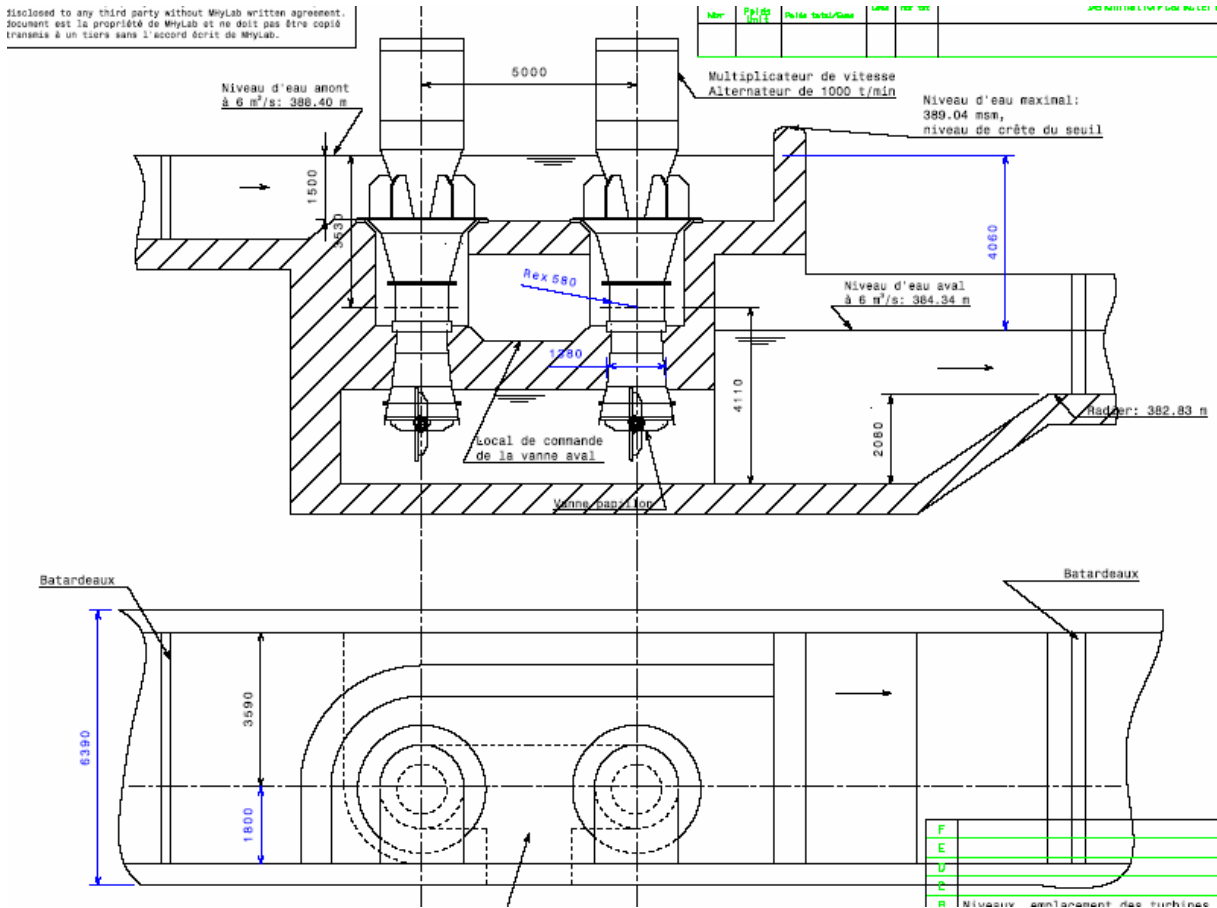


Figure 9. Croquis d'encombrement des deux turbines Kaplan - Annexe 11 -

On utilisera autant que possible l'acier inoxydable pour la construction de la turbine.

La roue est en porte-à-faux sur l'arbre de l'alternateur.

Le choix de la turbine s'est porté sur une turbine de type Kaplan à axe vertical, à chambre d'eau.

L'aspirateur est dimensionné de manière à obtenir une vitesse de 2 m/s en sortie au débit maximal, soit un diamètre de sortie de 1386 mm pour un débit d'équipement de 3.0 m³/s. Il est de type droit (sans coude), et débite dans un petit bassin qui sera creusé en amont du canal de fuite.

Un muret-déversoir sera construit en sortie du canal de fuite, c'est-à-dire à l'arrivée dans la Venoge. Ce déversoir isole le canal de fuite du cours d'eau, et des limons charriés par celui-ci. Ainsi, il sera équipé d'un système de batardeaux pour permettre son nettoyage. De plus, il garantit une immersion permanente de la sortie de l'aspirateur.



GÉNÉRATRICE

Type		synchrone
Fréquence	Hz	50
Tension triphasée aux bornes	V	400
Vitesse de rotation	t/min	1000
Puissance électrique	P_{el}	177
Cos φ		0.9
Puissance apparente	kVA	197
Classe de protection		IP23
Classe de refroidissement		IC 01

Tableau 12. Principales caractéristiques de la génératrice

Les paliers seront à roulements graissés, d'une durée de vie de 100'000 heures. Ils devront tenir compte du fait que la roue de la turbine est en porte-à-faux sur l'arbre.

L'excitation triphasée sera à diodes tournantes, sans bague, avec si possible réglage de tension et de Cos φ incorporé à la machine.

VANNES, BATARDEAUX ET GRILLES DE L'INSTALLATION

Les vannes et systèmes de batardeaux à installer sont les suivants:

- A l'entrée de la prise d'eau: la vanne d'entrée sera équipée d'une grille grossière.
- Dans la chambre d'eau des turbines: en plus d'une grille et d'un dégrilleur, un système de batardeaux sera intégré pour isoler la chambre de d'eau et la nettoyer.
- A la sortie de l'aspirateur de la turbine: vanne papillon automatique pour l'arrêt de la turbine et son nettoyage.
- A la sortie du canal de fuite: le muret-déversoir sera équipé d'un batardeau pour isoler le canal de fuite et le nettoyer.

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. Le signal devrait être fourni en 4 – 20 mA.

La turbine pourra fonctionner en automatique ou en manuel (mise en route et couplage au réseau).

En cas de déclenchement de réseau, le redémarrage se fera de manière automatique. Il en est de même en cas d'arrêt consécutif à une alarme, si celle-ci disparaît sans intervention humaine.

Les tableaux comprendront en outre les éléments suivants :

- Commande des pales avec affichage de l'ouverture,
- Réglage de Cos φ (si non inclus dans l'alternateur).

Les indicateurs suivants seront à fournir :

- Voltmètre, wattmètre, fréquencemètre, mesure du Cos φ , synchroscope, compte tour,
- Indicateur de niveau amont,
- Indicateur de charges des batteries de secours,
- Compteur d'heures, compteur de démarrages,
- Températures des roulements et du bobinage de l'alternateur,



- Arrêt d'urgence.

Les alarmes suivantes devront être traitées :

- Niveau d'eau amont insuffisant,
- Surcharges alternateur,
- Survitesse,
- Arrêt d'urgence,
- Défaut de mise en marche,
- Roulements alternateurs,
- Bobinages,
- Retour de courant,
- Surcharge batteries,
- Défaut batterie.

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

Une régulation spéciale sera réalisée pour le nettoyage des pales de la roue motrice et du distributeur. Elle consistera à fermer la vanne aval de la turbine pour provoquer un remous. Elle sera commandée suivant un algorithme mettant en relation une baisse de puissance associée à la mesure de la dénivellation et de l'ouverture des pales.

DISPOSITIF DE SÉCURITÉ

Tout dysfonctionnement de l'installation, y compris perte du réseau électrique, entraînera l'ouverture du disjoncteur principal, lequel commandera la fermeture de la vanne papillon de l'aspirateur de la turbine, de manière à limiter la survitesse du groupe.

RACCORDEMENT ÉLECTRIQUE

Se reporter aux schémas de l'Annexe 14.

La rénovation du bâtiment de la Chocolatière a impliqué l'intégration d'une nouvelle alimentation électrique, se situant au point A sur les schémas transmis par Romande Energie.

Le raccordement la petite centrale implique la pose d'environ 170 m de câbles, dans un environnement bâti assez complexe.

La variante A demande la pose de câble d'une section de 95 mm², et la variante B de 240 mm², étant donné les puissances électriques maximales en jeu.

Aucun transformateur n'est donc nécessaire.

Travaux d'aménagement du site

SEUIL ET ÉCHELLE À POISSONS

Se reporter aux plans n°2649-8 et 2649-9 (Annexe 1, Annexe 2).

Le seuil existant a été partiellement détruit par une crue en mars 2001.

A part le seuil proprement dit les travaux dans le lit de la rivière comprennent aussi :



- une échelle à poissons réalisée selon les directives du SESA
- un renforcement de la rive gauche, sur la Commune de Bussigny
- un renforcement de la rive droite sur la Commune d'Echandens

Le bureau CONUS & BIGNENS SA est chargé de la remise en état par le canton de Vaud.

Le plan n° 2649-8 montre l'ouvrage terminé alors que de nombreuses opérations liées à la technique de construction devront être réalisées pour atteindre le stade définitif. Le plan intitulé « ETAPES DE CONSTRUCTION » n° 2649-9, décrit en détail les phases de construction indispensables et par lesquelles il sera possible d'atteindre l'état final même en cas de crues exceptionnelles de la Venoge.

Ces phases sont les suivantes :

- **Etape n° 1: Construction du seuil en rive droite**
 - 1° Démontage du reste de seuil entre la rive droite et le centre de la rivière
 - 2° Battage d'un batardeau de palplanches fermé arrêté à la cote 390.00 msm
 - 3° Création des pieux d'ancrage
 - 4° Création du nouveau seuil dans cette enceinte
 - 5° Coupe des palplanches aval à la cote 387.20 msm pendant l'étape n° 2
- **Etape n° 2: construction de la digue en rive droite**
 - 1° Creuse des fondations de la digue rive droite
 - 2° Création de la digue rive droite sous protection de l'étape 1 et coupe des palplanches; le point 5° de l'étape n° 1 sera effectué au cours de cette opération
- **Etape n° 3: construction de la digue en rive gauche**
 - 1° déplacement des graviers riverains
 - 2° creuse de la fondation de la digue gauche et de l'échelle à poissons
 - 3° création de la digue et de l'échelle à poissons
- **Etape n° 4: construction du seuil rive gauche**
 - 1° Démontage des restes du seuil
 - 2° Battage des palplanches à 390 msm
 - 3° Création des pieux
 - 4° Création du nouveau seuil dans l'enceinte
 - 5° Coupe des palplanches amont et aval à la cote 387.20 msm
- **Etape n° 5: construction de l'échelle à poissons rive gauche**
 - 1° Protection par sacs de sable sur le seuil rive gauche
 - 2° Déplacement vers le centre rivière des graviers de protection
 - 3° Création de l'échelle à poissons en rive gauche
- **Etape n° 6: construction de l'échelle à poissons rive droite**
 - 1° Protection par sacs de sable sur le seuil rive droite
 - 2° Création de l'échelle à poissons en rive droite par basses eaux

Le plan n° 2649-9 décrit les étapes et les matériaux mis en place. Le clavage entre les deux éléments du seuil se fera uniquement par basses eaux et avec des mortiers spéciaux.



L'échelle à poissons possède une pente générale de 8% avec une implantation ferme des blocs dans un soubassement béton en sorte de créer derrière les blocs des niches de repos pour faciliter la remontée de la faune, même de petite taille.

Le fond sous le radier de béton est remblayé au fur et à mesure du développement du chantier sous protection du seuil reconstruit et surélevé et d'une butte provisoire en gravier protégeant la zone latéralement en cas d'élévation du débit de la Venoge.

PRISE D'EAU ET VANNE DU CANAL

La **prise d'eau** a été construite immédiatement à l'amont du seuil. Elle a apparemment résisté à la crue après la destruction du seuil pour sa partie rive droite. Tout au plus son radier a été miné par l'érosion et la réparation n'est pas difficile.

Les murs latéraux, particulièrement à l'aval, ont un peu souffert de l'arrachement du seuil, mais il n'y a pas de faiblesse évidente. Ce mur aval sera cependant largement consolidé par la création de l'échelle à poissons. Il ne paraît pas indispensable de l'ausculter plus en détail dans cette étape des opérations.

Plus tard, il pourra être également utile de contrôler la verticalité et le parallélisme des rails de guidage de la vanne.

La **vanne du canal** est en bois avec un équipement mécanique de réglage, manœuvré à la main. Cet équipement de réglage ne sera utilisé qu'en début de turbinage ou en cas de besoin de remise en état du canal.

La structure métallique de la vanne, du type guillotine, et le mécanisme semblent dans un état suffisant. Par contre les panneaux en bois (épaisseur 8 à 10 cm) sont pourris et doivent être remplacés. La rotation du mécanisme est protégée par un cadenas. La clé est en mains du garde-pêche.

Après un réglage soigné de la vanne guillotine, plus aucun déplacement vertical n'est nécessaire. Aussi une motorisation n'est pas nécessaire.

CANAL D'AMENÉE ET AMÉNAGEMENT DES BERGES.

Suite aux travaux de curage et de terrassement en déblais effectués afin de retrouver la capacité hydraulique nécessaire à l'exploitation, l'ensemble des berges sera réaménagé avec différentes techniques végétales. Elles contribueront à la protection des sols riverains, à l'intégration paysagère de l'ouvrage et, dans une certaine mesure, à l'accomplissement de certaines fonctions biologiques.

Des travaux forestiers d'abattage et débroussaillage seront également nécessaires, préalablement aux terrassements. Ils concernent prioritairement la berge droite du canal (mis à part le tronçon n°3) et dans une moindre mesure, la berge gauche des tronçons n° 1, 2 et 4 (voir Plan n° CHOC-0807-1, Annexe 6).

Géotextile biodégradable

L'ensemble de la berge gauche du canal sera couvert avec un géotextile tissé, biodégradable, en coco, du sommet de berge jusqu'au-dessous de l'interface terre-eau. Ce matériau permet de protéger avec effet immédiat les berges fraîchement terrassées, des phénomènes de ruissellement et ravinement. Ceci dans l'attente du développement d'une couverture herbacée dense, suffisamment efficace pour relayer cette fonction protectrice. Le contact direct de la berge gauche avec le sentier, le chemin carrossable et les terres agricoles, justifie cette option d'aménagement. Cela permettra également de limiter considérablement l'apport de particules fines dans le lit.

En berge droite par contre, les réseaux racinaires de la végétation ligneuse présente en lisière de forêt induit une meilleure cohésion des matériaux terreux. En plus, les enjeux sont moindres côté forêt, donc l'économie du géotextile est possible.

Ensemencement

Au dessus du niveau d'eau, l'ensemble des berges et zones talutées sera ensemencé par projection



hydraulique. Cette technique permet d'intervenir après la pose du géotextile, puisque les semences projetées se logent à l'intérieur des interstices du treillis de coco. Elle permet également un traitement rapide des surfaces en pente et une répartition homogène des semences. Les colloïdes projetés avec la «bouillie» empêchent le ravinement des graines et les engrais également incorporés favorisent une levée rapide.

Le mélange grainier sera composé en majorité de graminées ripicoles et de quelques légumineuses (famille des trèfles). Les espèces présentant une installation rapide, comportant un système racinaire efficace en terme de stabilisation et favorisant un développement dense de la couverture végétale, seront favorisées.

A terme, les herbacées contribueront à la stabilité des berges, d'une part en raison du système racinaire dense qu'elles développeront et d'autre part, par la couverture formées par les tiges aériennes. Ce niveau de protection suffit sur la majorité du tracé, compte tenu des forces d'arrachement extrêmement faibles en présence. De plus, la rugosité induite par les herbacées reste faible, ce qui est primordial pour ne pas perturber l'écoulement dans le canal.



Photo 9. Évolution d'un ensemencement à travers un géotextile tissé, biodégradable.

Digue «renforcée» et fascine d'hélophytes

Au niveau des tronçons n°4 et 6 (voir Plan n° CHOC-0807-1, Annexe 6), la berge gauche devra être surélevée pour permettre le passage des débits prévus, sans débordement. Des matériaux terreux provenant du terrassement des berges seront donc mis en place en remblai et compactés. Afin de renforcer leur cohésion, ils seront partiellement « enrobés » d'un géotextile tissé en coco (740 g/m²), puis ensemencés. Au niveau de l'interface terre-eau, le géotextile formera un bourrelet dans lequel seront intégrées des mottes de végétaux hélophytes (semi-aquatiques). En croissant à travers le géotextile, elles formeront un cordon de végétation un peu plus robuste que les herbacées provenant de l'ensemencement, mais surtout plus efficace, pour protéger cette zone d'autant plus sensible lorsqu'elle est surmontée d'un remblai (même de faible hauteur).



Photo 10. Mottes d'hélophytes intégrées dans une berge renforcée avec un treillis de coco (état juste après la mise en place).



Tressage de saule

Sur le tronçon n° 7, la berge gauche est en extrados d'une légère courbe. Bien que les forces d'arrachement restent faibles, un tressage de saules est proposé pour protéger l'interface terre-eau. En effet, en plus de renforcer le pied de berge, le développement des tiges ligneuses issues de cet ouvrage de protection formera une séparation physique bienvenue, à un endroit où le canal et le chemin sont juxtaposés. En effet, un niveau d'eau très proche du sommet de berge peut, à cet endroit, poser des problèmes de sécurité. Ce d'autant qu'un hangar agricole est tout proche et que des manœuvres avec des machines peuvent être fréquentes à cet endroit. C'est également valable pour les promeneurs qui utilisent ce même chemin.



Photo 11. Tressage pour la protection du pied de berge (résultats après une période de végétation et détails).

Saules têtards

Plusieurs saules blancs (*Salix alba*) sont concernés par les travaux d'abattage. Sur les branches les plus droites, il sera possible de prélever des pieux (ou grosses boutures) de 10 à 15 cm de diamètre et de 2 à 3 m de long. Fichés en terre en sommet de berge sous forme d'alignements, ces pieux formeront des rejets et pourront à terme constituer des saules têtards (sous condition d'une taille appropriée). Cette mesure purement paysagère contribuera à l'intégration de l'ouvrage et soulignera la présence de l'eau (silhouette caractéristiques des saules têtards). Elle concerne la berge gauche des tronçons n° 2 et 3.



Photo 12. Plantation de pieux provenant de l'abattage de saules et évolution en saule têtard

Remarque: Il peut s'avérer nécessaire de supprimer la conduite se trouvant sous le pont en fin de canal d'amenée, comme montré sur la Figure 3, et ce plus particulièrement dans la variante B.



INTÉGRATION DES TURBINES AU SITE

L'ancien local de turbinage a été vidé de ses machines. Seules subsistent les deux conduites d'amenée.

Les turbines seront implantées dans la même zone que l'ancien local de turbinage. Leur intégration à l'infrastructure nécessite:

- Une profondeur libre de 8 m sous le plan d'eau du canal d'amenée, ce qui implique une reprise en sous-œuvre de 3 m de hauteur sur une surface de 110 m²,
- la mise en place de 140 m³ de béton avec une épaisseur maximale de 4 m sous le corps supérieur des machines.

Le détail des travaux est décrit dans le devis à l'Annexe 13, tandis que l'Annexe 12 remplace le croquis d'encombrement dans les plans de l'infrastructure actuelle, issus du bureau Crausaz SA.

Chaque turbogroupe pèse environ 5 tonnes. Il peut être décomposé en 4 parties:

1. la partie électrique: multiplicateur de vitesse + alternateur
2. l'entonnement amont (les entretoises), la roue, le bâti roue
3. l'aspirateur
4. la vanne papillon.

Chaque groupe de pièce sera amené à proximité du bâtiment côté canal d'amenée, d'où il pourra être amené jusqu'à l'emplacement des anciennes turbines, soit:

- par un système de potence pivotante équipée d'un palan, qui roule (grâce à un système de rail) sur la crête au mur latéral du canal d'amenée, côté locatif.
- par un système de portique, qui roule sur les deux crêtes des deux murs latéraux du canal d'amenée.

L'aspirateur sera scellé dans le béton tandis que les autres parties seront démontables. Les vannes aval devront être démontables par le dessous grâce à un système de chariot installé dans le canal de fuite. L'entonnement amont et la roue seront démontés par le dessous grâce au palan.

Avec ces systèmes de montage-démontage, le canal d'amenée sera à l'air libre (donc non couvert).

Le multiplicateur et l'alternateur seront dans un caisson étanche, et isolé phoniquement, qui sera fixé au mur du locatif. Aucun toit n'est nécessaire, les turbines peuvent rester à l'air libre. Une attention particulière sera portée sur le fait que le locatif ne devra pas recevoir les vibrations de ce caisson.

Un local de commande des vannes aval devra être prévu en tunnel avec accès avec une trappe depuis le locatif.

Le local technique (4 m x 4 m x 2 m de haut environ) devra être intégré au bâtiment locatif, au dessus du niveau d'eau amont.

CANAL DE FUITE

Le canal de fuite est dans un état suffisant au niveau du génie civil. Il possède un fond moellonné encombré de matériaux terreux, de pierres et d'arbustes. Les pieds droits sont également moellonnés sur une hauteur de 2 à 3 m, hauteur difficilement contrôlable avec les dépôts, puis les murs sont surmontés de talus herbeux.

L'intervention d'un forestier sera nécessaire afin de suivre le contrôle de l'état des jointoyages des moellonnages dans les secteurs où les arbres et arbustes ont été supprimés.

Jusqu'en 2002 avant la rupture du seuil sur la Venoge, le canal de fuite évacuait les hautes eaux qui traversaient l'usine et rejoignaient la Venoge par le canal de fuite. Dès 2002 la rupture du seuil sur la Venoge a fait que les seules eaux d'alimentation courante du canal de fuite étaient les eaux météorites que les 850 m du canal d'amenée recevaient du fait de sa situation en travers de la pente. Une très récente crue de la Venoge a fait que les eaux de celle-ci sont remontées par le canal de fuite jusqu'à l'usine, en laissant des traces terreuses sur la végétation. Il n'est pas exclu que d'autres crues



aient établi le même phénomène mais ces problèmes n'ont pas été constatés ou répertoriés.

Ce canal de fuite est très encaissé près de l'usine, où après une zone élargie étalant le rejet du turbinage, le gabarit du canal proprement dit est établi à 4 m de largeur, entre deux murs en maçonnerie de moellons de 2 m de hauteur, surmontés de 2 talus entre 30° et 45° sur 2 à 3 m de hauteur selon les endroits. Le fond du canal paraît naturel. Il est très envasé. Des arbrisseaux, voire des arbres ont pris racines dans le fond, dans les murs en dérangeant le moellonnage ou dans les talus. Un ponceau le traverse à environ 30 m du début amont du canal. Le gabarit libre dessous permet quand même à une petite machine de passer pour curer le fond du canal.

Vers le milieu du tracé, les murs s'abaissent progressivement pour atteindre moins de 1 m de hauteur, au rejet dans la Venoge. Inversement les hauteurs de talus augmentent en allant vers l'aval.

Les talus de la rive gauche, côté Rieben sont largement encombrés de ronces, d'arbrisseaux, et quelques grands arbres à proximité de la Venoge. Le mur rive gauche est généralement en bon état, mais il faudra dégager la végétation pour s'en assurer.

Les talus de la rive droite, côté zone industrielle, sont très encombrés principalement d'arbres. Certains ont même pris racines dans les murs. Cette rive possède un lit majeur qui pourra être utilisé comme chemin de roulement pour le processeur, l'essarteuse ou l'épareuse qui traiteront le talus.

Les arbres gênants seront abattus et débités sur place en laissant des troches. Les troches seront réduites au minimum compatible avec la tenue des talus. Il ne sera procédé à l'essouchage seulement qu'en cas d'absolue nécessité.

A quelques endroits, le mur de rive droite a été fortement fissuré, voire détruit et de petits glissements de matériaux fins entraînés par les eaux météorites encombrant le lit.

Une petite machine, de type araignée devra être descendue dans le lit du canal pour extraire les vases, les glissements et amener une partie des matériaux de réparation des murs sur les lieux.

Ceci étant et après dévégétalisation, réparation des murs de pieds et enlèvement des sables et vases, le gabarit du canal de fuite est suffisant pour évacuer 6 m³/s.

Conclusions, remarques et suggestions

Le doublement du débit concédé à 6 m³/s implique le rehaussement du seuil de 35 cm, de manière à garantir un écoulement dans le canal d'amenée favorable au turbinage.

Ce doublement du débit et ce rehaussement se traduisent par une énergie hydraulique brute du site multipliée par 1.4, et une production électrique multipliée par 1.3, avec un total au final de 727'000 kWh/an en intégrant deux turbines Kaplan en chambre d'eau dans l'ancien local de turbinage.

Cette réhabilitation du site correspond à un prix de vente de 25.9 cts/kWh selon l'Ordonnance sur l'Energie du 14 mars 2008, tandis que le prix de revient, calculé selon cette même ordonnance et sur la base des devis établis par l'EIL, Conus et Bignens SA et MHyLab, est estimé à 23.9 cts/kWh, soit un résultat encourageant pour la suite du projet.

Il est à noter que le succès de ce projet réside en la réhabilitation des canaux, et notamment le renforcement des berges, afin, notamment, d'en réduire les travaux d'entretien.

En vue de la réalisation du projet, les étapes suivantes devront être franchies :

- Contact avec les autorités cantonales et présentation de cette étude de faisabilité.
- Réalisation de l'avant-projet détaillé de la variante retenue.
- Réalisation de la notice d'impact.
- Elaboration du dossier de mise à l'enquête et mise à l'enquête
- Elaboration des dossiers d'appel d'offres (Génie civil et électromécanique)
- Appels d'offres
- Analyse des offres et adjudication



- Elaboration du dossier d'exécution
- Réalisation

Annexes

Annexes liées au seuil et à l'échelle à poissons:

- Annexe 1. Seuil et échelle à poissons – plan d'ensemble, plan n°2649-8 (Conus & Bignens, février 2008)
- Annexe 2. Seuil et échelle à poissons – étapes de construction, plan n°2649-9 (Conus & Bignens, février 2008)
- Annexe 3. Seuil sur la Venoge et passe à poissons – devis estimatif global (Conus & Bignens, février 2008)

Annexes liées aux canaux d'amenée et de fuite:

- Annexe 4. Profil en long du site de la Chocolatière, Etat initial et variante 1 (Ecole d'Ingénieurs de Lullier – juin 2007): Plan n° CHOC-0807-3
- Annexe 5. Carnet des coupes transversales du canal d'amenée et du canal de fuite (Ecole d'Ingénieurs de Lullier – juin 2007): Carnet n°CHOC-0807-2
- Annexe 6. Canal d'amenée, aménagement des berges (Ecole d'Ingénieurs de Lullier – juin 2007): Plan n° CHOC-0807-1
- Annexe 7. Restauration du canal d'amenée: profil-type (tronçon 6) et plan de détail (Ecole d'Ingénieurs de Lullier – juin 2007): Plan n° CHOC-0807-9
- Annexe 8. Estimatif des coûts de restauration du canal d'amenée (Ecole d'Ingénieurs de Lullier – juin 2007)
- Annexe 9. Estimatif des coûts de restauration du canal de fuite (Conus & Bignens - août 2007)

Annexes liées aux turbogroupes et au local de turbinage:

- Annexe 10. Plan du sous-sol et coupe E-E, La Chocolatière, les Lofts d'Echandens (Crausat Consultant, novembre 2007): plan n°100/12
- Annexe 11. Croquis d'encombrement des deux turbines Kaplan en chambre d'eau – variante B- (MHyLab, avril 2008): dessin n°Ma0704-0003-3A
- Annexe 12. Intégration des turbines à l'infrastructure: superposition du croquis d'encombrement des deux turbines aux plans réalisés par le Bureau Crausaz ((Conus & Bignens – avril 2008)
- Annexe 13. Estimatif des coûts de remise en état de la zone de turbinage (Conus & Bignens, avril 2008)

Annexes diverses:

- Annexe 14. Raccordement électrique: deux croquis de principe (Romande Energie, février

