



RÉHABILITATION DE LA CENTRALE DE VICQUES, EMILE AEBIN SA

ETUDE D'AVANT PROJET

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, www.rwb.ch



Date 30.04.07

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: 101726

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



Table des matières

| | |
|--|----|
| Résumé | 4 |
| Introduction | 5 |
| Description générale du projet | 5 |
| Données de base | 6 |
| Hydrologie | 7 |
| Débit maximal turbinable en fonction de l'infrastructure actuelle | 8 |
| Débit maximal selon le canal d'amenée | 8 |
| Débit maximal selon les conduites | 9 |
| Débit maximal selon le canal de fuite | 10 |
| Dénivellation exploitable | 10 |
| Installation d'une nouvelle turbine en remplacement de la turbine Francis actuelle | 12 |
| Description du nouvel aménagement | 12 |
| Conduite et perte de charge | 12 |
| Chute nette | 13 |
| Critères de choix pour le dimensionnement de la turbine | 14 |
| Vitesse de rotation | 14 |
| Calcul de la production | 14 |
| Principales caractéristiques du turbogroupe | 17 |
| Description détaillée de l'équipement hydromécanique | 17 |
| Turbine | 17 |
| Multiplicateur de vitesse | 18 |
| Vannes | 18 |
| Mise en place, montage et démontage du turbogroupe | 18 |
| Description détaillée de l'équipement électrique | 19 |
| Génératrice | 19 |
| Contrôle commande | 19 |
| Dispositif de sécurité | 20 |
| Raccordement électrique | 20 |
| Description détaillée des travaux de génie civil | 20 |
| Canal d'amenée/ bassin de captage | 20 |
| Prise d'eau et dégrilleur | 21 |
| Conduite forcée | 21 |
| Local de turbinage | 21 |
| Passe à poissons | 22 |
| Calculs économiques | 23 |
| Remarques et conclusions | 25 |
| Annexes | 25 |



Résumé

Le renouvellement du droit d'eau de la petite centrale de la scierie Emile Aebin SA, à Vicques, entraînant l'installation d'une passe à poissons, une étude de réhabilitation du site a été menée avec l'objectif d'optimiser l'utilisation de la ressource en eau.

Selon le droit d'eau actuel précisant un débit maximal de 600 l/s et une chute de 3.35 m, le site, équipé d'une turbine Francis datant de 1919, a une capacité de 13 kW électrique, pour une production de l'ordre des 75'000 kWh/an.

La nouvelle installation, équipée d'une turbine axiale à 4 pales, d'une puissance électrique de 38 kW, exploitera un débit maximal de 2 m³/s, et générera une production électrique de 140'000 kWh/an (dont en moyenne plus de 60 % en été), pour un prix de revient de 31.5 cts/kWh.

La réhabilitation, qui demande donc la négociation d'un nouveau droit d'eau, pourrait s'avérer financièrement faisable à l'avenir, malgré le prix de revient élevé, vu l'évolution des conditions cadre en cours de négociation et la nouvelle Loi sur l'Approvisionnement en Electricité.



Introduction

Dans le cadre du plan annuel 2006 du programme petites centrales hydrauliques de Suisse Energie, MHyLab, en partenariat avec le bureau de génie civil RWB SA, a été mandaté par la Société Emile Aebin SA, représentée par M. Stéphane Aebin, pour effectuer une étude d'avant-projet de la réhabilitation de la petite centrale de la scierie Aebin.

Description générale du projet

Une première visite du site a eu lieu le 17 mai 2006. Le 18 août 2006 et le 12 janvier 2007, le bureau RWB SA a procédé à des relevés de terrain. Une séance avec l'Office des Eaux et de la Protection de la Nature du canton du Jura s'est également tenue le 3 novembre 2006.

La scierie Aebin, située à Vicques (canton du Jura) est équipée d'une turbine Francis depuis 1914, date de la concession, utilisant les eaux de la Scheulte. Cette concession précise un **débit maximal de 600 l/s**, pour une chute de **3.35 m**.

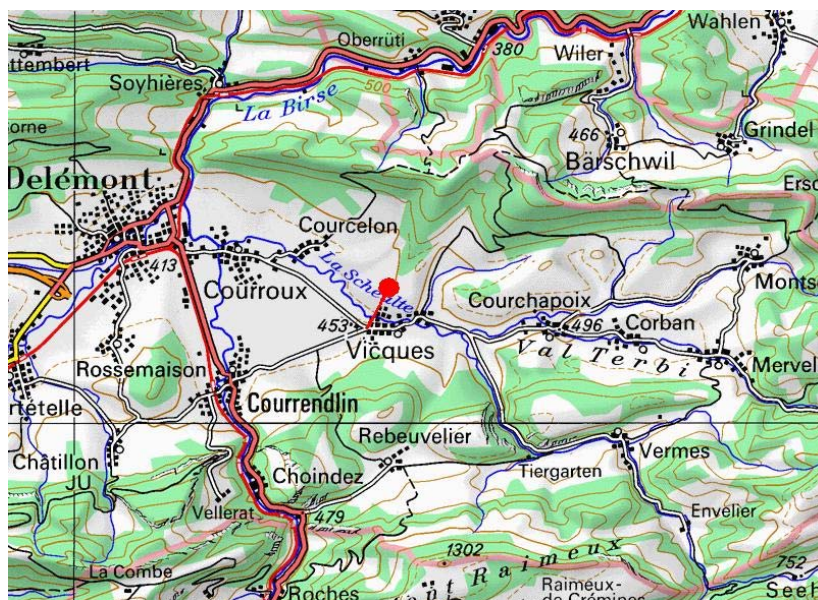


Figure 1. Plan de la région où se situe la scierie Aebin

La centrale actuelle comprend:

- un seuil équipé d'un système de vannes,
- un canal d'amenée équipé d'une grille et d'un dégrilleur,
- deux conduites en béton enterrées sur une cinquantaine de mètres,
- une chambre d'eau,
- un turbogroupe Francis comprenant un multiplicateur à courroie,
- un canal de fuite enterré sur une cinquantaine de mètres puis à l'air libre également sur 50 mètres environ.

Se référer au plan de l'Annexe 1.

Le renouvellement de cette concession impliquant l'installation d'une **passerelle à poisson**, une première étude a été réalisée en 2006 afin de trouver un optimum économique en terme de turbinage. Il en résulte que le **remplacement de la turbine Francis actuelle** est la solution la plus intéressante en terme technique, financier et environnemental.

Cette seconde étude vise à approfondir cette variante au point technique et économique, de manière à permettre au mandant d'établir une demande de renouvellement de concession.





Photo 1. Canal d'amenée et seuil



Photo 2. Turbogroupe: multiplicateur à courroie et alternateur



Photo 3. Vue de la scierie depuis l'aval avec la sortie du canal de fuite de la turbine Francis

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} | $^{\circ}C$ | 10 |
| Masse volumique de l'eau à 10 $^{\circ}C$ | ρ | kg/m^3 | 999.7 |



HYDROLOGIE

Une station de mesures compile les débits journaliers de la Scheulte à Vicques, en amont du site de la Scierie, depuis 1992.

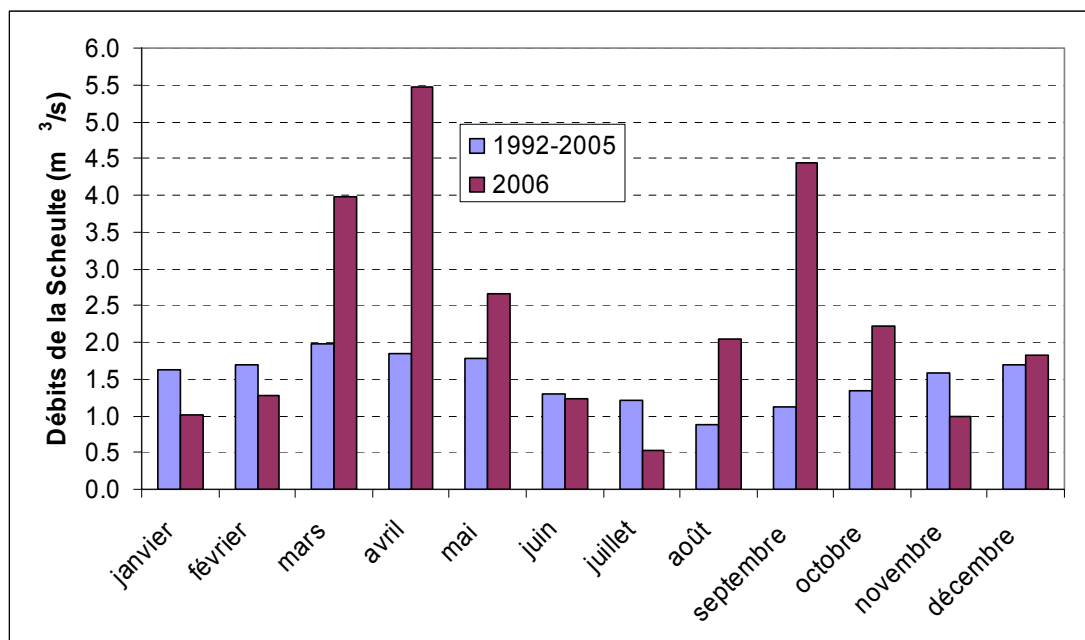


Figure 2. Moyennes mensuelles de la Scheulte (1992-2005 et 2006)

La figure suivante donne la courbe des débits classés de ce cours d'eau, déterminée à partir des moyennes journalières des années 1992 à 2005.

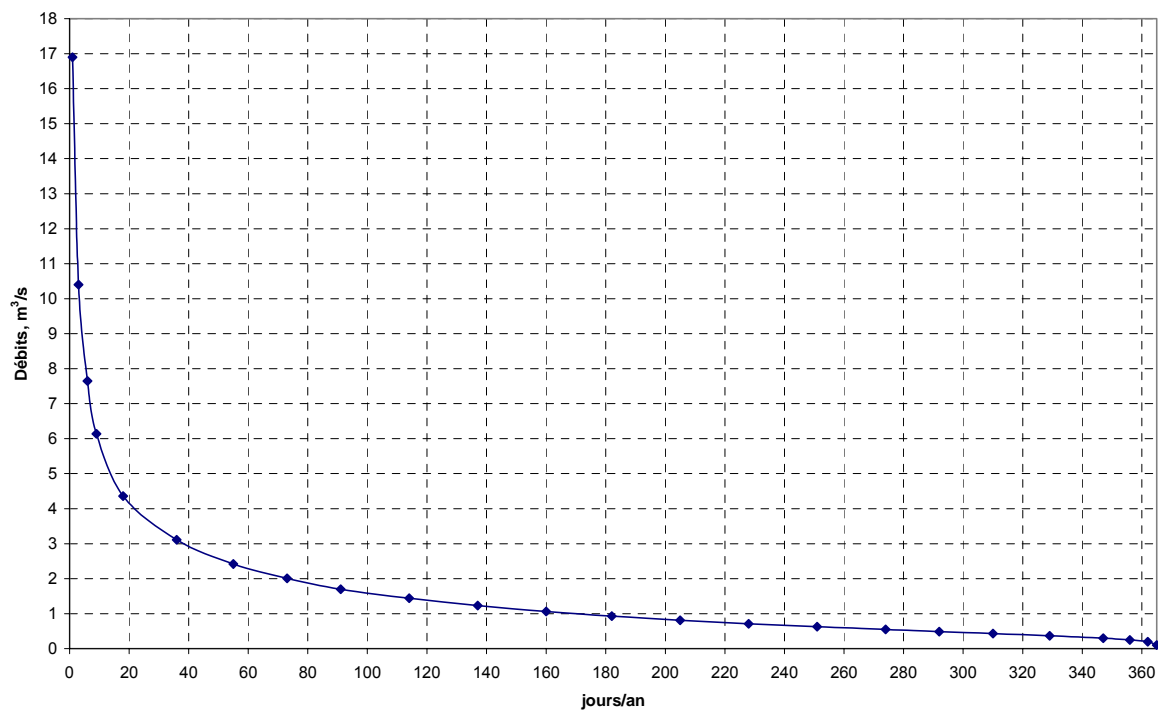


Figure 3. Courbe des débits classés de la Scheulte établie à partir des moyennes mensuelles des années 1992 à 2005



La Scheulte présente un débit variant sur une plage relativement réduite tout au long de l'année avec une courte période d'étiage en été.

La demande de concession établie le 30 mai 1912 stipule un **débit résiduel de 200 l/s**. Or suivant la loi sur la protection des eaux (article 31), le débit atteint ou dépassé 347 jours par an selon la courbe des débits classés 1992-2005 étant de 300 l/s, le débit résiduel est calculé comme suit, en l/s:

$$Q_r = 130 + \frac{300 - 160}{10} \cdot 4.4 = 192 \quad [\text{l/s}]$$

L'Office des Eaux et de la Protection de la Nature devra se prononcer sur ce débit résiduel. Ici, l'étude prend en compte la valeur de 200 l/s, correspondant au débit transitant par la passe à poissons.

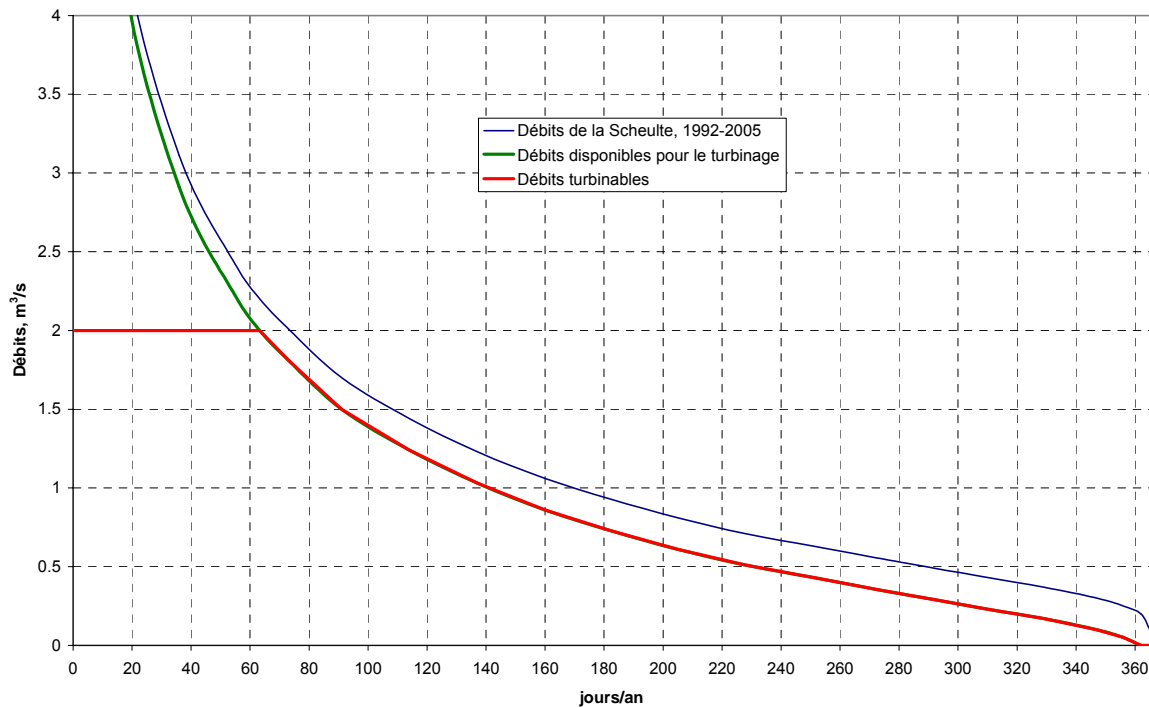


Figure 4. Courbes des débits classés pour les années 1992- 2005

Conformément à la courbe des débits classés, le **débit maximal d'équipement possible est de 2 m³/s** atteint ou dépassé plus de 60 jours par année, alors que la **concession limite ce débit à 600 l/s**, atteint ou dépassé plus de 200 jours par année.

DÉBIT MAXIMAL TURBINABLE EN FONCTION DE L'INFRASTRUCTURE ACTUELLE

L'objectif étant de limiter les travaux de génie civil (et donc leur coût) et d'intégrer le nouveau turbogroupe au site de manière optimale, il s'agit de déterminer le débit maximal pouvant transiter dans le canal d'aménée, les conduites et le canal de fuite existants.

Débit maximal selon le canal d'aménée

Afin de réduire les remous de surface, la vitesse d'approche dans le canal d'aménée doit être au maximum de $v_0 = 1.2 \text{ m/s}$.

$$Q_{\max} = S_{\text{canal aménée}} \cdot v_0 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Avec: $S_{\text{canal aménée}}$: section verticale du canal d'aménée [m²]

Largeur du canal d'aménée: 3.00 [m]

Profondeur du canal d'aménée: 1.25 [m]

Donc: $Q_{\max} = 4.5$ [m³/s]



Ainsi, compte tenu de la courbe des débits classés, le canal d'amenée existant n'est pas limitant en terme de débits.

Débit maximal selon les conduites

L'alimentation de la chambre de la turbine Francis existante s'effectue par deux conduites forcées en béton (cf. Photo 4), chacune de 48 mètres de long. L'une a un diamètre interne de **750 mm**, tandis que l'autre a un diamètre interne de 500 mm.



Photo 4. Conduites vues depuis la chambre d'eau

En considérant ces conduites en charge, le débit maximal pouvant transiter est défini par la perte de charge, l'objectif étant d'obtenir un **rendement de conduites d'au moins 95 %**, la dénivellation de référence étant de 2.9 m (se reporter au paragraphe "Dénivellation exploitable").

Vu l'état de ces conduites, on pose une **rugosité de 1.0 mm**, correspondant à une conduite en béton de plusieurs dizaines d'années.

Le tableau suivant donne les principales caractéristiques des conduites actuelles.

| Conduites | | 1 | 2 | Total |
|-------------------------------------|--------------------------------|------|------|-------|
| Diamètre interne | mm | 750 | 500 | |
| Longueur | m | 48 | 48 | 48 |
| Rugosité (estimée) | mm | 1 | 1 | 1 |
| Dénivellation | m | 2.90 | 2.90 | 2.90 |
| Coefficient de perte de charge, kHr | s ² /m ⁵ | 0.4 | 3.3 | 0.2 |
| Rendement minimal des conduites | % | 95 | 95 | 95 |
| Perte de charge maximale totale | m | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| Débit maximal dans les conduites | m ³ /s | 0.60 | 0.21 | 0.81 |

Tableau 1. Caractéristiques des conduites actuelles

L'équation suivante, basée sur la formule de Colebrook, permet d'évaluer la perte de charge des deux conduites.

$$H_r = K_{Hr} \cdot Q_t^2$$

avec: H_r = perte de charge [m]



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

Q_t = débit transitant [m³/s]

Il s'avère que les conduites sont plus contraignantes que le canal d'amenée, limitant le débit à 0.81 m³/s, vu les exigences de rendement. Elles devront donc être changées.

Note: Dans le cas où ces conduites ne sont pas en charge, le débit transitant est limité à 1.3 m³/s par leur pente.

Débit maximal selon le canal de fuite

D'une hauteur moyenne de 0.8 m pour une largeur moyenne de 1.1 m, le canal de fuite est pratiquement horizontal (avec une légère tendance à remonter). Il permet de diminuer l'influence du niveau de la rivière sur le niveau d'eau aval pris en compte pour la turbine, et donc de maximiser la dénivellation disponible pour le turbinage.

Afin de permettre l'écoulement adéquate de l'eau en sortie de turbine, une pente devra être créée en remontant le niveau du fond de ce canal à partir du point de restitution à la rivière. Ce réhaussement entraîne la diminution de la section de passage, le plafond voûté du canal enterré ne pouvant être modifié.

Le canal de fuite enterré ne devant pas se mettre en charge (pour éviter tout risque d'inondation du local de turbinage notamment), une hauteur d'air minimale de 0.2 m devra être maintenue en permanence.

Finalement, étant donné le réhaussement du fond et la zone d'air, le débit maximal pouvant transiter dans le canal de fuite est de 0.80 m³/s.

Ainsi, vu les travaux de génie civil engendrés par la modification de ce canal de fuite, il n'est pas intéressant économiquement de l'utiliser. L'eau turbinée sera donc directement restituée en sortie de turbine dans la Scheulte (se reporter au plan de l'Annexe 2).

DÉNIVELLATION EXPLOITABLE

La dénivellation, variable suivant le débit de la rivière, est définie par (se reporter au plan de l'Annexe 1):

- le niveau d'eau amont qui correspond à la crête du seuil, d'après les relevés effectués par RWB le 12 janvier 2007, soit 454.95 m,
- le niveau d'eau aval variable selon le débit de la rivière.

Il est à noter que, selon les recommandations de l'Office cantonal de l'Environnement et de la Protection de la Nature (OEPN), le niveau d'eau amont ne peut dépasser 454.95 m. Ainsi, il s'agira d'ouvrir les vannes en période de hautes eaux afin de limiter la hauteur de la lame d'eau.

Le tableau suivant explicite les bases de la détermination de l'évolution de la dénivellation en fonction du débit de la rivière.



| Date | | | | 26.07.2006 | 12.01.2007 | 18.08.2006 | | |
|---|----|-------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|-------------|------------------|
| Régime de la rivière | | | pas de débit | basses eaux | | | hautes eaux | très hautes eaux |
| Débit de la rivière | Q | m ³ /s | 0 | 0.33 | 1.35 | 3.04 | 4 | 6 |
| Niveau d'eau amont | Z0 | m | 454.95 | 454.95 | 454.95 | 454.95 | 454.95 | 454.95 |
| Niveau d'eau aval de la rivière à la sortie du local de turbinage | Z2 | m | 451.30 | 451.55 | 451.65 | 452.45 | 452.75 | 452.75 |
| Source | | | Relevés RWB 18.08.06 | hypothèse | Relevés RWB 12.01.07 | Relevés RWB 18.08.06 | Hypothèse | Hypothèse |
| Dénivellation | DZ | m | 3.65 | 3.40 | 3.30 | 2.50 | 2.20 | 2.20 |

Tableau 2. Etablissement de l'évolution de la dénivellation en fonction du débit de la rivière

On considère qu'en période de hautes eaux, soit pour un débit supérieur à 4 m³/s (atteint ou dépassé une vingtaine de jours par an), la dénivellation plafonne à 2.20 m.

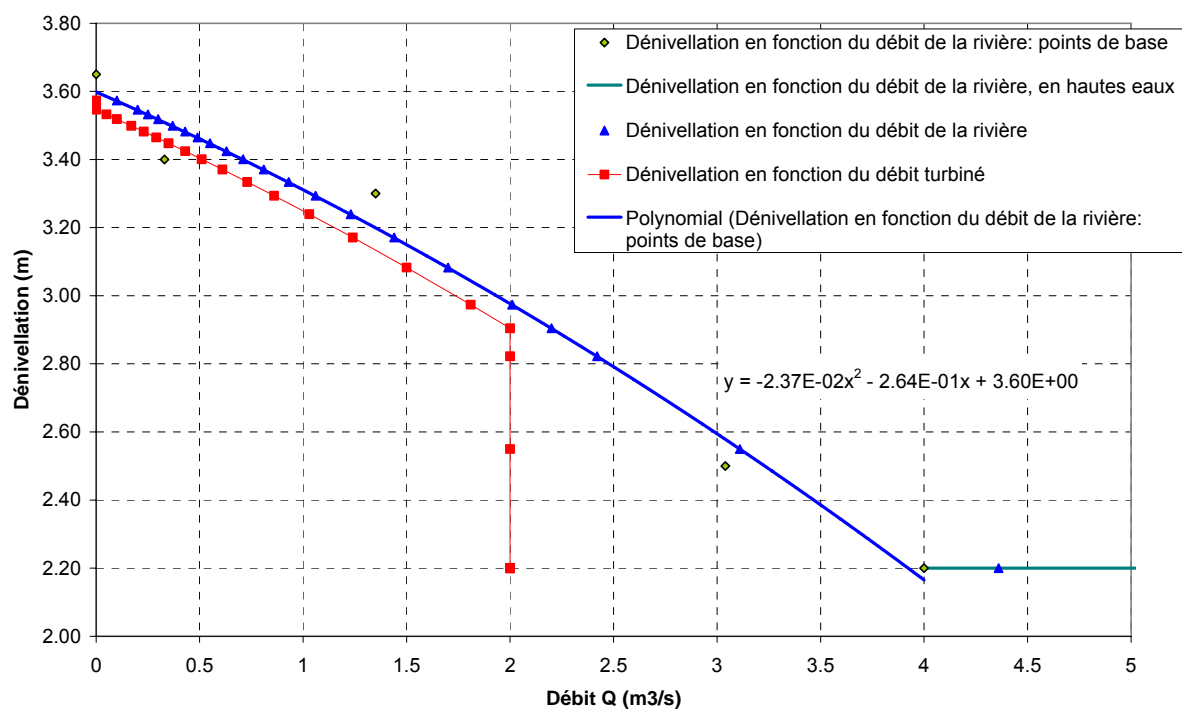


Figure 5. Evolution de la dénivellation en fonction du débit de la rivière et du débit turbiné

Ainsi, pour un débit turbiné de 2 m³/s, la dénivellation varie entre 2.2 et 2.9 m, suivant la courbe des débits classés de la rivière. La dénivellation de référence est ainsi posée à 2.9 m.



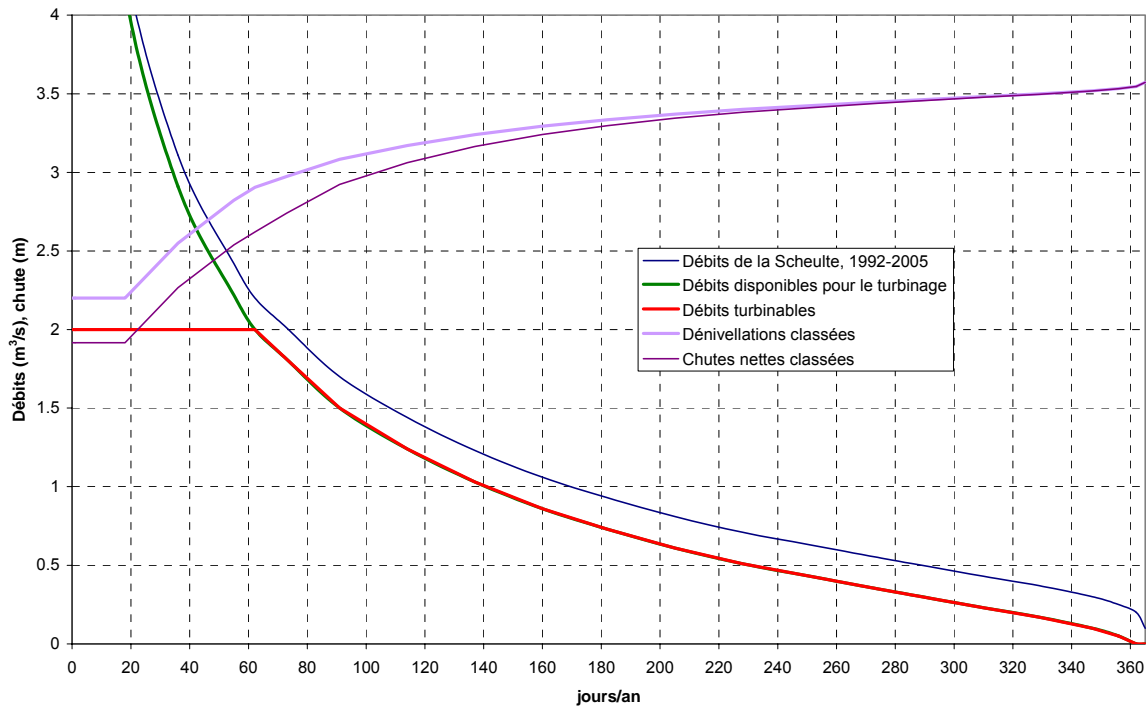


Figure 6. Courbes des débits et des chutes classés

Installation d'une nouvelle turbine en remplacement de la turbine Francis actuelle

DESCRIPTION DU NOUVEL AMÉNAGEMENT

Compte tenu de la courbe des débits classés, la nouvelle turbine sera dimensionnée pour un débit de **2 m³/s** et une **dénivellation de 2.9 m**. Un tel débit implique:

- l'établissement d'un nouveau droit d'eau, vu l'augmentation du débit maximal,
- le changement des conduites actuelles, leur rendement étant de 70 % pour un tel débit,
- l'aménagement du local de turbinage (abandon de la chambre d'eau),
- la création d'un nouveau canal de fuite directement à la sortie de la turbine (abandon du canal de fuite existant).

CONDUITE ET PERTE DE CHARGE

En reprenant le raisonnement exposé au paragraphe intitulé "Débit maximal selon les conduites", et en posant une rugosité de 0.1 mm, correspondant à une conduite en bon état en acier ou en fibre de verre (renforcée en béton), le diamètre interne minimal de la nouvelle conduite, posée en place de l'existante, permettant de faire transiter un débit de 2 m³/s, pour un rendement supérieur à 95 % est de **1'100 mm**.



| | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|
| Diamètre interne | mm | 1100 | 1200 |
| Longueur | m | 48 | 48 |
| Rugosité (estimée) | mm | 0.1 | 0.1 |
| Dénivellation | m | 2.90 | 2.90 |
| Débit maximal | m ³ /s | 2 | 2 |
| Coefficient de perte de charge, kHr | s ² /m ⁵ | 0.03 | 0.02 |
| Perte de charge | m | 0.12 | 0.08 |
| Rendement de la conduite au débit max | % | 96 | 97 |

Tableau 3. Caractéristiques de la nouvelle conduite

Compte tenu des standards du marché et de la perte de charge, la suite des calculs prendra en compte une conduite de diamètre interne de **1'200 mm, ce qui correspond à une perte par frottement de 0.08 m.**

Dans le cas d'une **turbine en chambre d'eau**, à cette perte par frottement s'ajoute **la perte cinétique** au niveau de l'arrivée de l'eau dans la chambre d'eau, calculée au débit de dimensionnement de 2 m³/s par:

$$H_{rc}(Q_t) = \frac{v(Q_t)^2}{2g}$$

Avec: Q_t : débit turbiné [m³/s]
 $H_{rc}(Q_t)$: perte cinétique dans la chambre d'eau au débit turbiné [m]
 $v(Q_t)$: vitesse en sortie de conduite calculée par: [m/s]

$$v = \frac{Q}{R^2 \cdot \Pi} = \frac{2}{0.6^2 \cdot \Pi} = 1.8 \quad [m/s]$$

Avec: R : rayon interne de la conduite [m]

D'où $H_{rc} = 0.16$ [m]

Face à cette perte cinétique de 0.16 m, représentant plus de 5 % de la dénivellation de 2.9 m, nous choisissons de **ne pas développer un dimensionnement en chambre d'eau.**

CHUTE NETTE

Face à la précision de l'évolution de la chute en fonction des débits de la Scheulte, la perte de charge dans la grille, et dans le canal de fuite est négligée.

La chute nette, prenant en compte la perte dans la conduite et dans l'aspirateur de la turbine, peut être calculée comme suit:

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

Avec: $H(Q_t)$: chute nette au débit turbiné [m]

Q_{max} : débit d'équipement, soit 2.0 [m³/s]

$\Delta Z(Q_t)$: dénivellation fonction du débit turbiné et de celui de la Scheulte [m]



K_{Hr} : coefficient de perte de charge, soit $K_{Hr} = 0.02$ [s²/m⁵]

v : vitesse en sortie d'aspirateur, soit 2 [m/s]

Soit une perte de charge maximale de 0.28 m, soit 9 % de la dénivellation de référence.

Le choix d'une vitesse de 2 m/s est un compromis entre la récupération de l'énergie cinétique dans l'aspirateur et les conditions d'écoulement en sortie de turbine, valeur généralement admise par les constructeurs.

CRITÈRES DE CHOIX POUR LE DIMENSIONNEMENT DE LA TURBINE

Vu la dénivellation inférieure à 5 m et la courbe des débits classés, le choix d'une turbine axiale Kaplan à 4 pales mobiles et à distributeur fixe s'impose.

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

- la répartition des rendements en fonction des débits et des chutes disponibles est optimale,
- le diamètre de roue est minimal, et la vitesse de rotation maximale, afin de limiter la taille du turbogroupe, de favoriser son intégration au site, et de limiter les coûts,
- le comportement en cavitation sous une telle variation de chute n'est pas problématique pour une turbine à 4 pales développée en laboratoire.

De plus, il s'avère que le choix d'installer deux turbines n'est pas pertinent en terme de taille et de coûts, la taille d'une turbine avec un débit nominal de 2 m³/s étant raisonnable.

VITESSE DE ROTATION

Nous considérons que la vitesse de 428 t/min est minimale pour une génératrice en prise directe, en terme de taille, de coût et de disponibilité sur le marché. Or, pour tous les cas de figure étudiés, les vitesses de rotation naturelles sont très nettement inférieures à 428 t/min.

La vitesse naturelle de la turbine pour la variante retenue étant de **270 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.

CALCUL DE LA PRODUCTION

La production électrique annuelle, E_{tot} , 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 $\eta(Q_t)$ = rendement global de l'installation, produit du rendement mécanique et de celui de l'alternateur, fonction du débit [-]

Le rendement mécanique est ici défini par la formule suivante:

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

avec:

- $\eta_{\text{turbine}}(Q_t)$: rendement de la turbine en fonction du débit turbiné et de la chute disponible, comme présenté à la Figure 7,
- η_{palier} : rendement des paliers, fixé 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:
$$\eta_{\text{mécanique}}(Q_t) = 0.94 \cdot \eta_{\text{turbine}}(Q_t)$$



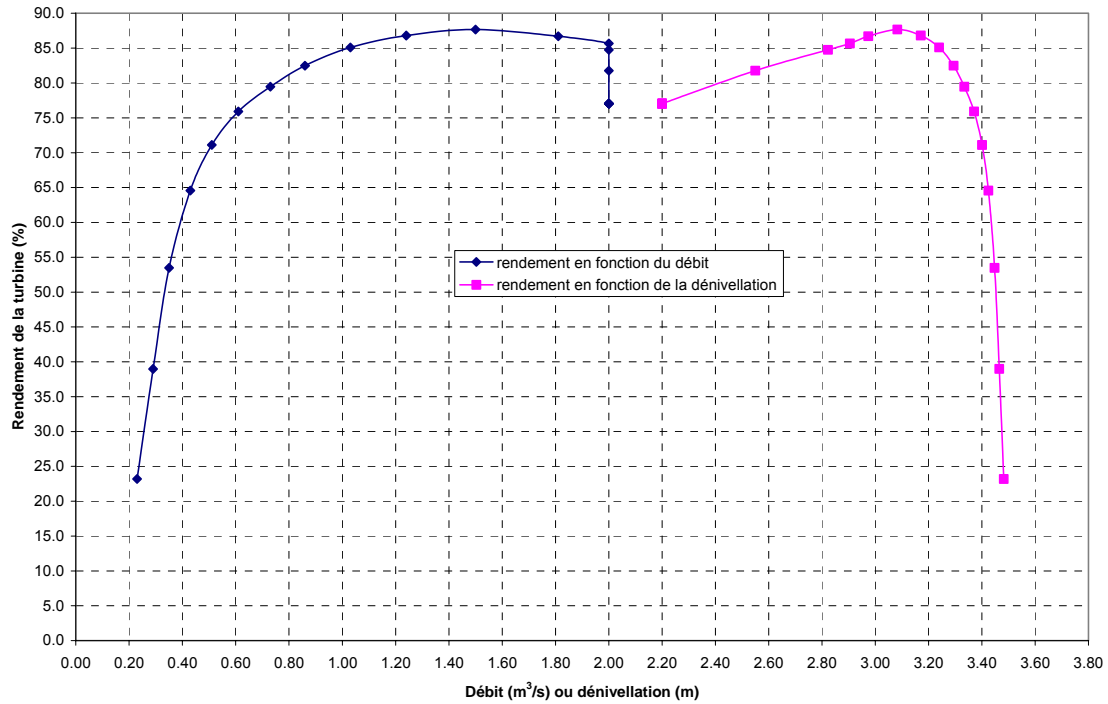


Figure 7. Evolution du rendement turbine en fonction du débit et de la dénivellation disponibles

Le rendement de la génératrice est donné selon des débits relatifs au débit d'équipement, comme montré sur la figure suivante, avec un maximum à 93 %.

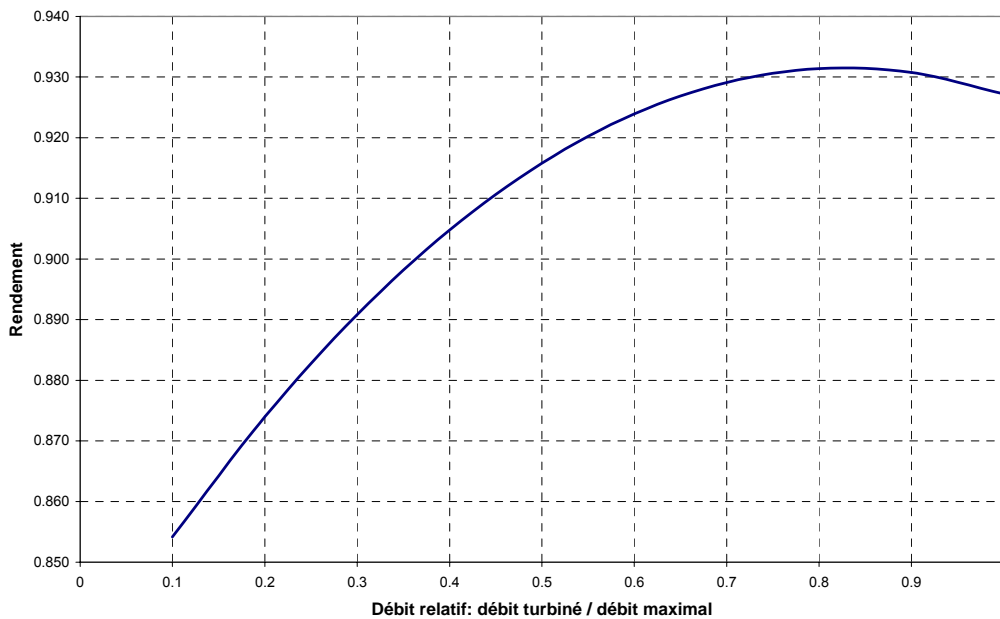


Figure 8. Courbe-type de rendement de la génératrice

Selon les recommandations du mandant, lorsque le débit de la Scheulte est **supérieur à 6 m³/s, soit une dizaine de jours par an, le turbogroupe est à l'arrêt**, le dégrilleur ne parvenant pas à évacuer les matériaux charriés par la rivière (branche, feuilles, etc.).

La Figure 9 montre le graphe des puissances classées, la surface délimitée par les courbes représentant l'énergie.



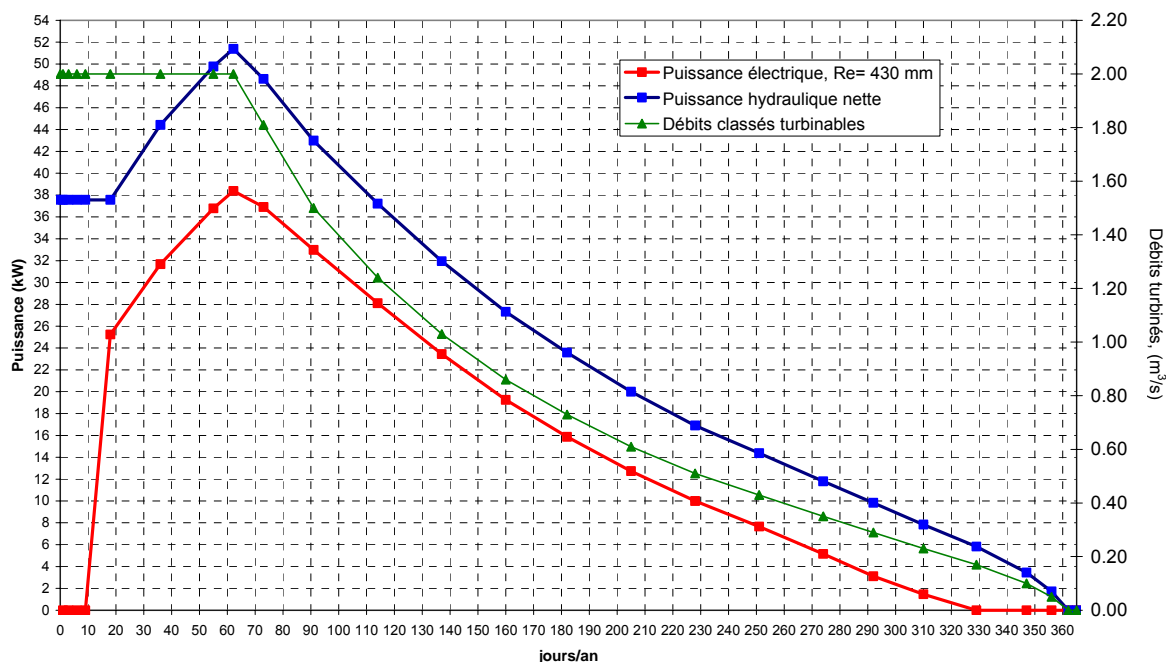


Figure 9. Courbe des débits et des puissances classés de la nouvelle turbine axiale

Ainsi, compte tenu des hypothèses d'évolution de la chute nette en fonction du débit de la Scheulte, la production électrique annuelle moyenne s'élève à 140'000 kWh/an.

Finalement, il s'avère que la turbine fonctionnera en moyenne 320 jours par an.

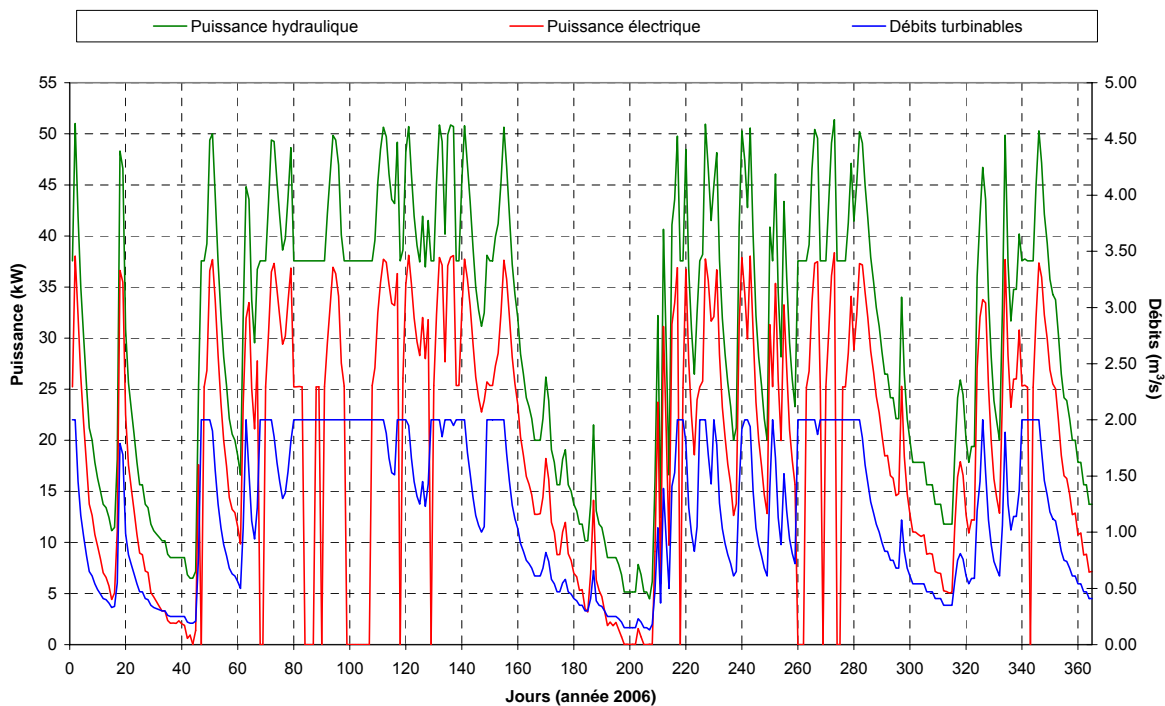


Figure 10. Débits turbinables et puissances de la nouvelle turbine axiale pour l'année 2006



PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU TURBOGROUPE

| | | |
|--|--|------------------------------------|
| Altitude niveau amont | Z_0 (m) | 454.95 |
| Altitude niveau aval de référence | Z_3 (m) | 452.05 |
| Débit d'équipement | Q_{\max} (m ³ /s) | 2.00 |
| Dénivellation de référence | ΔZ (m) | 2.90 |
| Diamètre de la conduite | | DN 1200 |
| Coefficient de perte de charge | KH_r (s ² /m ⁵) | 0.02 |
| Chute nette maximale à Q_{\max} | H_n (m) | 2.62 |
| Type de turbine | | axiale |
| Nombre de pales | (-) | 4 |
| Nombre de Turbines | Z_T (-) | 1 |
| Débit maximal | Q_{\max} (m ³ /s) | 2.00 |
| Débit minimal | Q_{\min} (m ³ /s) | 0.20 |
| Energie massique à Q_{\max} | $g H$ (J/kg) | 26 |
| Type de réglage | | Distributeur fixe, pales réglables |
| Ouverture du distributeur fixe | (°) | 50 |
| Hauteur d'aspiration maximale | H_s (m) | 6.5 |
| Diamètre externe de la roue | D_e (m) | 0.860 |
| Vitesse de rotation | N' (t/min) | 270 |
| Vitesse d'emballement maximale | N'_r (t/min) | 486 |
| Puissance hydraulique maximale | P_h (kW) | 51 |
| Puissance mécanique maximale | P_m (kW) | 44 |
| Puissance électrique maximale | P_e (kW) | 38 |
| Production hydraulique nette (base: moyennes journalières 1992-2005) | E_h (kWh/an) | 220'000 |
| Production électrique (base: moyennes journalières 1992-2005) | E_e (KWh/an) | 140'000 |
| Rendement de l'installation | % | 64 |
| Production électrique 2006 (base: moyennes journalières) | E_e (KWh/an) | 167'000 |
| Production électrique en été 2006 (base: moyennes journalières) | $E_{e \text{ été}}$ (KWh/an) | 106'000 |
| Production électrique en hiver 2006 (base: moyennes journalières) | $E_{e \text{ hiver}}$ (KWh/an) | 61'000 |
| Pourcentage de production en été | % | 63 |

Tableau 4. Caractéristiques principales du nouveau turbogroupe

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE L'ÉQUIPEMENT HYDROMÉCANIQUE

Turbine

Se reporter au croquis de principe de l'Annexe 3.

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.

Le choix de la turbine s'est porté sur un type saxo équipé d'une conduite forcée, compte tenu de la perte cinétique engendrée par l'aménagement en chambre d'eau (se reporter au chapitre "Conduite et perte de charge")

Le choix de la tubulure d'entrée s'est porté sur une conduite à section carrée. Ce type de conduite est issu du développement mené dans le cadre du programme helvético-européen SEARCH LHT. Il a été testé à la fois par analyse numérique d'écoulement et sur le stand d'essais MHyLab. Il répond aux exigences de forme simplifiée, de pertes de charge limitées et surtout de distribution optimale de l'énergie à l'entrée du distributeur.

L'axe de la turbine est incliné de 60° par rapport à la verticale de manière à limiter l'excavation sous la turbine.

L'aspirateur est dimensionné de manière à obtenir une vitesse de 2 m/s en sortie. La hauteur de l'aspirateur avec ou sans coude est relativement semblable, une version sans coude est ici retenue, ayant l'avantage d'être moins coûteuse.

Multiplicateur de vitesse

La turbine sera équipée d'un multiplicateur de vitesse à courroie. En effet, la prise directe demanderait une génératrice à 11 ou 12 paires de pôles, qui, pour cette puissance, serait, d'une part, trop onéreuse et d'autre part, difficilement disponible sur le marché.

Le multiplicateur de vitesse permet ainsi de relier la turbine à une génératrice de 1'000 t/min, qui est un modèle à haute performance, de taille réduite et standard sur le marché.

Vannes

La seule vanne prévue est la vanne papillon située dans l'aspirateur de la turbine, commandée par un système électrique à contre-poids. Elle est de constitution simple, circulaire, d'un diamètre de 1'500 mm, et devrait avoir également l'avantage d'être bon marché.

Mise en place, montage et démontage du turbogroupe

Le turbogroupe comprend les différentes parties suivantes:

- la conduite d'entrée à section carrée, d'une masse d'environ 500 kg, qui sera fixée au mur du local de turbinage, et ne sera pas démontable,
- l'ensemble turbo-générateur, d'environ 2.5 tonnes, qui sera facilement démontable grâce à un système de boulonnage,
- l'aspirateur, d'environ 500 kg, qui sera fixé à la dalle du local de turbinage, et ne sera pas démontable,
- l'armoie électrique, d'environ 200 kg.

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.

Chaque pièce pourra être amenée dans le local de turbinage sur 4 **rouleurs** depuis la cour jusqu'au local de turbinage par l'intérieur de la scierie.

Ensuite les pièces pourront être mises en place grâce à **deux palans** qui seront fixés à un système de chariots. Ces deux chariots se déplaceront sur un rail INP, parallèlement à l'axe d'écoulement de la turbine, rail scellé à ses extrémités aux murs porteurs de la centrale.



Vu leur faible période d'utilisation, l'achat des 4 rouleurs et des deux palans ne semble pas justifié ici, il est donc recommandé de les louer. Il est également possible que l'entreprise responsable du montage du turbogroupe dispose de ce matériel.

Le système de chariots sera quant à lui installé définitivement dans le local de turbinage.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE L'ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUE

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. Cette disposition permet:

- d'optimiser l'espace du local de turbinage
- 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 | 1000 |
| Puissance électrique | P_{el} | 38 |
| Cos φ | | 0.9 |
| Puissance apparente | kVA | 43 |
| Classe de protection | | IP23 |
| Classe de refroidissement | | IC 01 |

Tableau 5. Principales caractéristiques de la génératrice

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. 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.

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 éviter l'emballement du groupe.

Raccordement électrique

Le raccordement électrique se fera au réseau local des Forces Motrices Bernoises en basse tension.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL

L'intégration du nouveau turbogroupe, bénéficiant d'un nouveau droit d'eau, implique:

- l'assainissement du canal d'amenée,
- le remplacement des conduites,
- l'adaptation du local de turbinage,
- la création d'un nouveau canal de fuite,
- la construction d'une passe à poissons.

Canal d'amenée/ bassin de captage

- Longueur : environ 12 m.



- Section : 300 x 125 cm

Les travaux de génie civil comprendront un curage du fond du canal, l'évacuation des matériaux et l'assainissement ponctuel des éléments existants en maçonnerie ou en béton. Il n'y a pas de nouvel ouvrage à reconstruire.

Rien n'est prévu sur la paroi en rocher et moellons côté route car l'état de celle-ci est complètement inconnu car recouvert de végétation

Prise d'eau et dégrilleur

- Longueur : 3.0 m.
- Section : environ 150 x 200 cm

Les travaux de génie civil comprendront la construction d'une nouvelle prise d'eau pour l'intégration de la conduite d'amenée et la mise en place du dégrilleur.

Cet élément sera en béton armé et de la même largeur que le dégrilleur actuel avec une surprofondeur pour le coude de départ de la conduite forcée.

Le dégrilleur existant est conservé, il sera simplement refixé sur le nouveau support en béton. Il n'est pas prévu de le remplacer à ce stade du projet.

Conduite forcée

- Longueur : 45 m
- Diamètre : 120 cm

Les 2 conduites d'amenée existantes seront remplacées par une seule conduite de diamètre 120 cm, afin de diminuer les pertes de charge et pouvoir prendre l'ensemble du débit à turbiner.

Il s'agira d'intégrer cette nouvelle conduite au site de manière à ce que sa mise en charge soit assurée (se référer au plan de la turbine –Annexe 3). Son entrée sera inclinée de manière à éviter tout problème de vortex.

Celle-ci sera enterrée sur le début du tronçon puis suspendue vers la chambre de turbinage. Les conditions d'appui actuelles ne sont pas connues.

De plus, elle devra supporter les charges de stockage du bois.

Local de turbinage

- Surface 8.80 x 3.00 m
- Hauteur : de 3.90 à 8.50 m

Le local existant et la chambre d'eau seront démolis et transformés en un nouveau local pour recevoir la turbine, avec une surprofondeur pour maintenir l'immersion de la sortie de la turbine. Un mur batardeau séparera la fosse de la rivière.

L'exutoire dans la rivière se fera à cet endroit, et non plus dans le canal de fuite actuel. Ce canal sera abandonné.

L'ensemble de ce nouveau local sera en béton armé. Il est difficile à ce stade de l'étude de savoir ce qui pourra être récupéré des constructions existantes.

Les étapes d'exécution des travaux sont les suivantes :

- Etayage des murs latéraux à conserver,
- Démolitions par étapes,
- Fouilles à la main dans la fosse actuelle pour reprises en sous-œuvre sous les murs existants,
- Bétonnage par étapes verticales et horizontales des sous-œuvres,



- Bétonnage du radier de la nouvelle fosse,
- Bétonnage des murs supérieurs et de la dalle.

L'ensemble de ces travaux doit être exécuté en petites étapes et en partie à la main, afin de ne pas déstabiliser les murs existants. Il s'agit de la partie la plus difficile car elle dépend de l'état actuel des structures existantes. De plus, ces travaux devront être effectués à l'intérieur du bâtiment. Enfin, certains murs devront être repris en sous-œuvre.

Une partie de ces travaux devront vraisemblablement se faire depuis le cours d'eau, il faudra donc planifier la période d'intervention en fonction des contraintes liées aux cours d'eau.

Passé à poissons

La passe à poissons (cf. Annexe 4) sera constituée de murs en béton latéraux avec un remplissage en empierrement pour créer les seuils nécessaires. Elle sera similaire à l'installation de Courrendlin sur la Birse (canton du Jura). Un enrochement latéral sur la rive sera mis en place afin de protéger la berge. Les seuils seront séparés par des barrages en bois.



Photo 5. Passe à poissons installées sur la Birse à Courrendlin (canton du Jura)

Une variante avec une passe à poisson à brosse serait possible, et à étudier ultérieurement si cette solution s'avérait meilleur marché. Là aussi, la période d'intervention devra être planifiée en fonction des travaux en rivière.





Photo 6. Exemples de passe à poissons à brosse (source: Université de Kassels, Allemagne)

Calculs économiques

Les calculs économiques prennent en compte les points suivants:

- Les investissements sont estimés à $\pm 20\%$.
- Tous les coûts sont donnés hors taxe.
- En **électromécanique**, l'estimation des coûts a été faite en se basant sur des réalisations comparables et comprend principalement le coût du turbogroupe complet (turbine, vanne, multiplicateur de vitesse, alternateur) et du raccordement électrique, soit un montant total estimé à **250'000 CHF**. Il est à noter que ce coût est très fluctuant compte tenu du marché des matières.
- Les coûts de **génie civil** sont décrits dans le tableau suivant.

| | | |
|---------------------------|------------|----------------|
| Bassin de captage | CHF | 10'000 |
| Prise d'eau et dégrilleur | CHF | 15'000 |
| Conduite forcée DN 1200 | CHF | 80'000 |
| Local de turbinage | CHF | 105'000 |
| Passe à poissons | CHF | 55'000 |
| Total génie civil | CHF | 265'000 |

Tableau 6. Investissements en génie civil

- L'Office des Eaux et de la Protection de la Nature demande que soit effectuée une **étude hydraulique de la rivière sur 500 m de part et d'autre de la petite centrale**, dont le montant, estimé par RWB SA (avril 2007) s'élève à **15'000 CHF**. Elle comprend:
 - le relevé de 10 profils sur place,
 - le dessin des profils hydrauliques,
 - la modélisation du cours d'eau,



- o la recherche des débits et le calage du modèle,
- o la simulation et les calculs hydrauliques.

Cette étude pourrait entrer dans le cadre de la Cartographie des dangers naturels que chaque canton doit établir d'ici 2011.

Le montant de cette étude est inclus dans les **frais d'ingénierie**. Les frais d'ingénierie supplémentaires (projet d'exécution) et les **divers et imprévus** sont estimés à 10 % de l'investissement.

- Les **frais d'exploitation**, comprenant les frais d'assurance, la taxe de puissance ainsi que les coûts de maintenance, d'entretien courant et de consommation d'énergie sont estimés à partir d'installations similaires, et des indications du Mandat vu son expérience avec l'installation actuelle.
- Le calcul du **chiffre d'affaire brut** se base sur le tarif promotionnel de **15 cts/kWh** selon les recommandations de l'Office Fédéral de l'Energie pour des producteurs indépendants. D'autres modalités sont cependant possibles en fonction de l'adoption définitive de la loi sur l'Approvisionnement en Electricité (LApEI) et des modifications induites sur la Loi sur L'Energie (LEn).
- Le **taux d'intérêt** considéré dans cette étude est de 4 %.
- L'analyse économique se base sur un remboursement de l'emprunt par annuités constantes.
- L'étude économique se base sur un coefficient d'annuité pondéré, en prenant en compte les **durées d'amortissement** suivantes:
 - o 12 ans pour l'appareillage,
 - o 25 ans pour l'électromécanique,
 - o 40 ans pour le génie civil.
- 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 standard.

| | | |
|--|----------------|----------------|
| Electromécanique | CHF | 250'000 |
| Contrôle commande | CHF | 50'000 |
| Génie civil | CHF | 265'000 |
| Frais d'ingénierie, divers et imprévus | CHF | 75'000 |
| Investissement total | CHF | 640'000 |
| Frais d'exploitation standard | CHF/an | 5'000 |
| Production annuelle | MWhe/an | 140 |
| Tarif de vente | cts/kWh | 15 |
| Chiffre d'affaire brut | CHF/an | 21'000 |
| Taux d'intérêt | % | 4.00 |
| Durée d'amortissement Génie civil | ans | 40 |
| Durée d'amortissement Electromécanique | ans | 25 |
| Durée d'amortissement Appareillage | ans | 12 |
| Coefficient d'annuité pondéré | % | 6.15 |
| Annuité | CHF/an | 39'000 |
| Bénéfice annuel | CHF/an | -23'000 |
| Prix de revient | cts/kWh | 31.5 |

Tableau 7. Calculs économiques



Remarques et conclusions

- La solution retenue correspond à une turbine axiale de type saxo alimentée par une conduite forcée, d'un débit d'équipement de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, pour une dénivellation de 2.90 m. D'une puissance électrique de 38 kW, le turbogroupe générera en moyenne 140'000 kWh/an.
- Il est à noter l'importance de l'évolution de la chute en fonction des débits de la Scheulte sur la production. Vu les informations disponibles, la détermination de cette évolution s'est voulue pessimiste avec une dénivellation de 2.20 m à partir d'un débit de la Scheulte de $4 \text{ m}^3/\text{s}$. De plus, à partir d'un débit posé à $6 \text{ m}^3/\text{s}$ de la Scheulte, le turbogroupe est à l'arrêt, le dégrilleur ne parvenant pas à gérer les matériaux charriés par la rivière.
- Compte tenu des conditions actuelles, et tant que cela est possible, nous recommandons au Mandant:
 - de continuer à exploiter la turbine actuelle et d'effectuer le minimum de travaux hors assainissement du seuil, des canaux et de la prise d'eau, ainsi que construction de la passe à poissons,
 - de négocier un droit d'eau à $2 \text{ m}^3/\text{s}$ permettant la réhabilitation,
 - de réaliser l'installation du nouveau turbogroupe dès que possible, face aux conditions cadre actuelles favorables à ce type de projet, malgré le prix de revient élevé.
- Nous vous rendons attentifs au fait que les rendements de turbine axiale utilisés ici sont ceux obtenus par des turbines développées en laboratoire, et nous vous conseillons de demander à tout fournisseur de turbine de justifier les rendements annoncés.

Annexes

Annexe 1: Plan de situation et profil en long du site actuel de la Scierie Aebin (source: RWB SA, 30.04.07)

Annexe 2: Plan de situation et profil en long du site futur de la Scierie Aebin (source: RWB SA, 30.04.07)

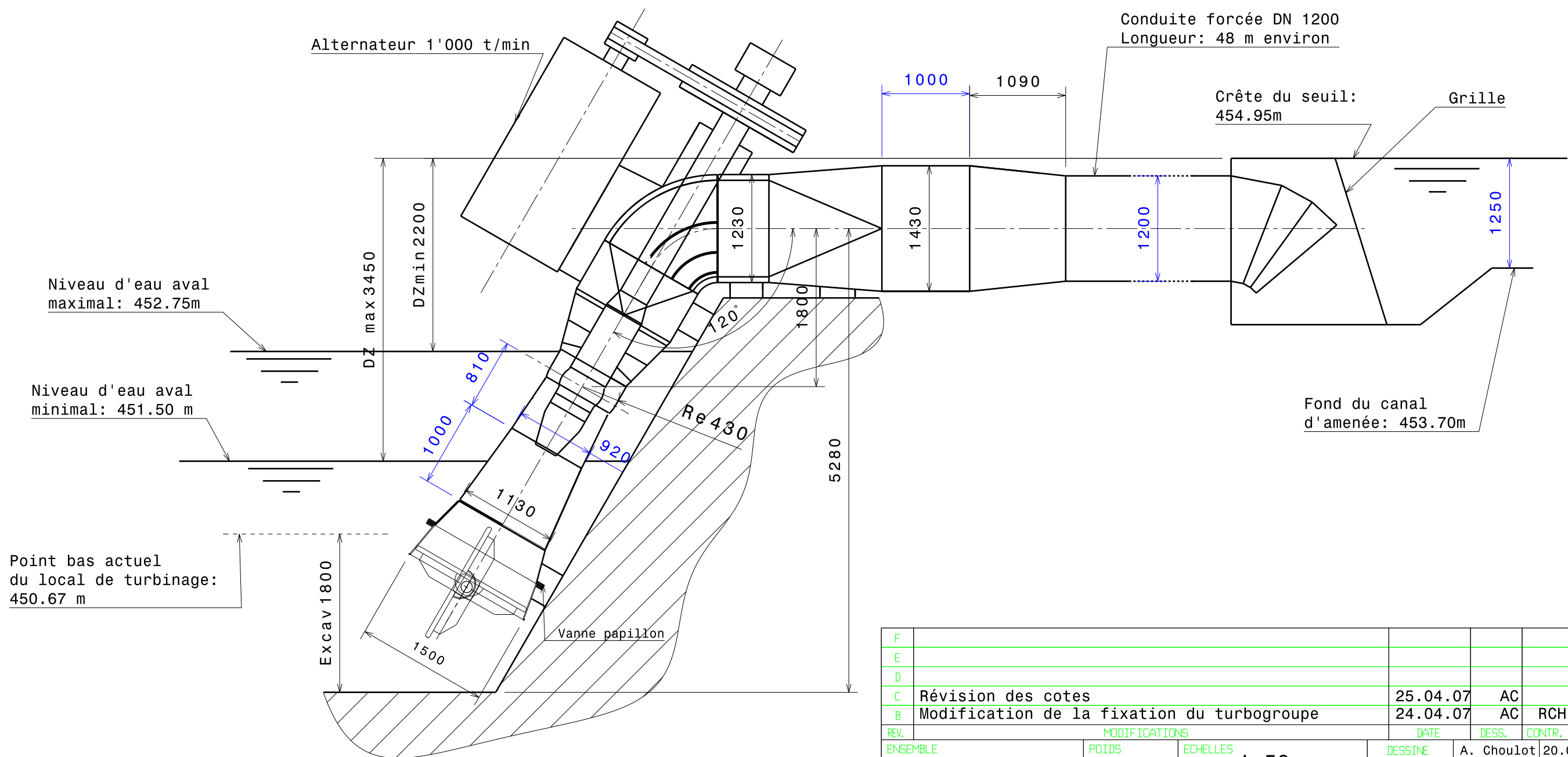
Annexe 3: Croquis de principe de la nouvelle turbine (source: MHyLab, 20.04.07)

Annexe 4: Plan de la passe à poissons (source: RWB SA, 27.04.07)



This document is the property of MHyLab and shall not be copied or disclosed to any third party without MHyLab written agreement. Ce document est la propriété de MHyLab et ne doit pas être copié ou transmis à un tiers sans l'accord écrit de MHyLab.

| 1 Execution | | | Code | Nbr tot | Denomination/Caracteristiques | Pos | Matiere | Observations |
|-------------|------------|------------------|------|---------|-------------------------------|-----|---------|--------------|
| Nbr | Poids Unit | Poids total/Exec | | | | | | |
| | | | | | | | | |



| REV. | MODIFICATIONS | DATE | DESS. | CONTR. | APPR. |
|------|--|----------|-------|--------|-------|
| F | | | | | |
| E | | | | | |
| D | | | | | |
| C | Révision des cotes | 25.04.07 | AC | | |
| B | Modification de la fixation du turbogroupe | 24.04.07 | AC | RCH | RCH |

| ENSEMBLE | POIDS | ECHELLES | DESSINE | DATE |
|----------|-------|----------|------------|----------|
| | | 1:50 | A. Choulot | 20.04.07 |
| | | | R. Chenal | 24.04.07 |
| | | | | |

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| Ma0623 Scierie Aebin Croquis d'encombrement Turbine axiale 4 pales, 50° Q = 2 m ³ /s, DZ = 2.90 m, N = 270 t/min | | | | |
|--|--|--|--|--|



Laboratoire de Mini-Hydraulique
1354 MONTCHERAND SUISSE

Ma0623-0001-3

REV.
C

DESSIN CCD (CÀTIA-CADAM-DRAFTING)

CENTRALE DE TURBINAGE

Stéphane AEBIN
Route de Rochefort 16
2824 Vicques

Passé à
poissons



VUE EN PLAN
PROFIL EN LONG
COUPE

