



# TURBINAGE DU FORESTAY COMMUNES DE CHEXBRES ET RIVAZ ETUDE D'AVANT PROJET

## Rapport final

Auteurs

**MHyLab**

En Platé, 1354 Montcherand, [info@mhyllab.com](mailto:info@mhyllab.com), [www.mhyllab.com](http://www.mhyllab.com)

**RWB Eau & Environnement SA**

Epervier 4, 2053 Cernier, [cernier@rwb.ch](mailto:cernier@rwb.ch), [www.rwb.ch](http://www.rwb.ch)



Date 13.06.07

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

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

Numéro de projet: 102050

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



## Table des matières

Résumé .....	4
Introduction .....	5
Situation.....	5
Données de base .....	6
Dénivellation exploitable.....	6
Hydrologie .....	6
Conduite forcée, chute nette et débit d'équipement.....	8
Principales dimensions de la turbine .....	10
Calcul de la production .....	12
Etude économique.....	13
Investissements .....	13
Investissement en électromécanique.....	13
Investissement en génie civil .....	14
Autres investissements .....	16
Frais d'exploitation .....	16
Calculs économiques.....	16
Principales caractéristiques de la variante retenue.....	19
Description technique de la variante retenue .....	20
Principe de fonctionnement de l'installation de turbinage .....	20
Turbine .....	20
Vannes .....	21
Alternateur .....	21
Raccordement électrique .....	21
Sécurité.....	21
Contrôle commande .....	21
Génie civil .....	22
Prise d'eau .....	22
Conduite forcée .....	23
Local de turbinage.....	28
Canal de fuite .....	28
Prise d'eau et conduite forcée existantes .....	29
Conclusions, remarques et suggestions .....	29
Annexes.....	30



## Résumé

Le bassin versant du Forestay, qui s'étend des bords du lac Léman à la région du lac de Bret, est constitué principalement de terres agricoles, de quelques forêts et de zones urbanisées: Puidoux et Chexbres. De Chexbres, le cours d'eau traverse le vignoble, dont il récupère les eaux de drainage, puis la commune de Rivaz, avant de se jeter dans le lac Léman.

Une petite centrale, appartenant à Romande Energie, attenante à l'ancienne Minoterie Coopérative du Léman, détruite aujourd'hui, utilise une partie de l'eau du Forestay (180 l/s au maximum), exploitant une chute de 63 m. Elle est équipée d'une turbine Pelton de plus d'une cinquantaine d'année, d'une puissance nominale de 89 kW environ. La production électrique moyenne est de l'ordre des 350'000 kWh/an.

Le projet actuel vise à réhabiliter cette centrale en construisant une prise d'eau au niveau de Chexbres, soit une dénivellation de 184 m disponible pour le turbinage. La variante retenue correspond à une utilisation optimale de la ressource en eau, avec un débit d'équipement de 500 l/s. Elle implique la pose d'une conduite de 1'096 m en DN 500, soit une chute nette de 173 m au débit d'équipement, dont une partie sera enterrée dans les berges de manière à respecter l'esthétique du site. La turbine Pelton, d'une puissance de 763 kW, sera équipée de 3 injecteurs. D'une puissance électrique maximale de 707 kW, le turbogroupe produira en moyenne 2'526'000 kWh/an, selon un prix de revient de 10.9 cts/kWh.



## Introduction

Dans le cadre du programme de développement des petites centrales hydro-électriques, MHyLab, en partenariat avec le bureau de génie civil RWB SA, a été mandaté par Romande Energie Renouvelable SA pour effectuer une étude détaillée de faisabilité du turbinage du Forestay, cours d'eau traversant les communes de Chexbres et de Rivaz.

Cette étude complète celle, sommaire, effectuée en septembre 2006, 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

Plusieurs visites de site ont eu lieu, dont la dernière pour les relevés, le 14 février 2007.

Le bassin versant du Forestay qui s'étend de la région du lac de Bret aux bords du lac Léman, est constitué principalement de terres agricoles, de quelques forêts et de zones urbanisées: Puidoux et Chexbres. De Chexbres, le Forestay traverse le vignoble, dont il récupère les eaux de drainage, puis la commune de Rivaz, avant de se jeter dans le lac Léman.

Une petite centrale, appartenant à Romande Energie, attenante à l'ancienne Minoterie Coopérative du Léman, détruite aujourd'hui, utilise une partie de l'eau du Forestay (180 l/s au maximum), exploitant une chute de 63 m. Elle est équipée d'une turbine Pelton à 1 injecteur de plus d'une cinquantaine d'année, d'une puissance nominale de 121 CV ou 89 kW environ. La production électrique moyenne est de l'ordre des 350'000 kWh/an.



*Photo 1. Centrale actuelle, attenante à l'ancienne minoterie*

Deux variantes ont été analysées dans l'étude sommaire dans le but de valoriser la chute:

- en deux paliers, avec l'installation d'une turbine au niveau de la prise d'eau actuelle,
- en un seul palier, avec le remplacement de la turbine actuelle.

Ici, seule la **variante en un seul palier**, présentant le prix de revient le plus intéressant, sera approfondie.

L'emplacement de la nouvelle prise d'eau se situerait à 559 m d'altitude, dans la commune de Chexbres, au niveau de la station de mesures du SESA.

Cet emplacement est choisi vu la structure canalisée du lit du Forestay.





*Photo 2. Emplacement de la future prise d'eau, au niveau de la station de mesures, à 559 m d'altitude*

Le local de turbinage sera construit à l'emplacement de l'actuel, soit à 375 m, le niveau du lac étant à 372 m.

Une conduite forcée sera installée entre cette prise d'eau et ce local de turbinage, remplaçant la conduite existante.

Se reporter au plan de situation (Annexe 1) et au profil en long (Annexe 2).

## Données de base

Les constantes de base suivantes sont considérées :

Accélération de la pesanteur	g	m/s <sup>2</sup>	9.806
Température moyenne de l'eau	T <sub>eau</sub>	°C	10
Masse volumique de l'eau à 10°C	ρ	kg/m <sup>3</sup>	1000.2

## Dénivellation exploitable

Les altitudes, relevées sur site par le bureau RWB SA en février 2007, sont les suivantes:

- altitude de la nouvelle prise d'eau, au niveau de la station de mesures: 559 m
- altitude de la centrale actuelle: 375 m.

**La dénivellation est donc de 184 m.**

## Hydrologie

Une station de mesures, située au niveau de la future prise d'eau et gérée par le SESA, compile les moyennes journalières de débits du Forestay depuis 1992.



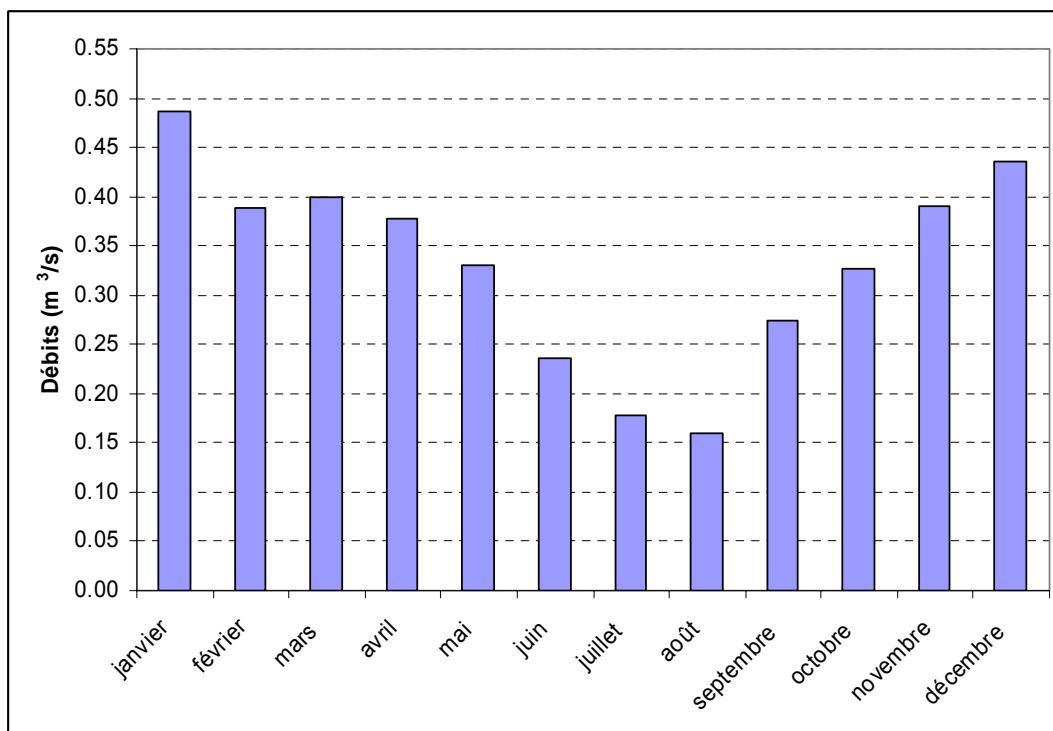


Figure 1. Débits mensuels moyens pour les années 1992 – 2005

Ainsi, le Forestay présente:

- une période de basses eaux en été, et de hautes eaux en hiver,
- un débit minimum journalier de 20 l/s, mesuré en 2004,
- un module annuel minimum de 204 l/s, correspondant à l'année 2003,
- un module interannuel de 337 l/s.

La Figure 2 montre la courbe moyenne des débits classés du Forestay pour les années 1992 à 2005.

D'après l'article 31 de la Loi fédérale sur la protection des eaux (Leaux), le **débit résiduel** dépend du débit atteint ou dépassé 347 jours dans l'année, qui est ici de 51 l/s pour les années 1992 à 2005. L'analyse se basera donc ici sur **un débit résiduel de 50 l/s**.



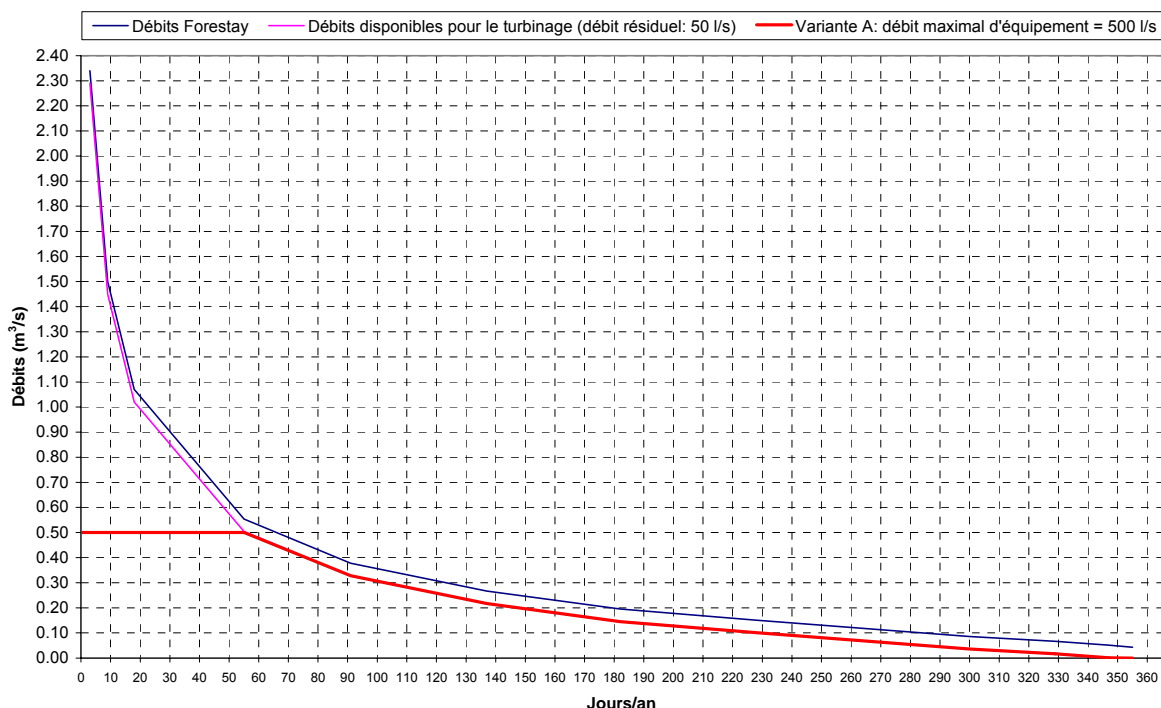


Figure 2. Courbes des débits classés pour le Forestay, des débits disponibles pour le turbinage et des débits maximaux turbinables

Face à la courbe des débits disponibles pour le turbinage (prenant en compte un débit résiduel de 50 l/s), **le débit d'équipement maximal possible est de 500 l/s**, atteint ou dépassé plus de 50 jours dans l'année.

### Conduite forcée, chute nette et débit d'équipement

Une nouvelle conduite d'une **longueur de 1096 m**, en acier ou en fonte, devra être posée entre la prise d'eau et la centrale, et remplacera donc la conduite existante (en DN 500 sur 190m, puis en DN 350 sur 79 m. En effet, sa résistance à une pression de 20 bar n'est pas déterminée à ce jour, la conduite n'étant jusqu'à lors soumise qu'à des pressions inférieures à 8 bar.

Le tracé de cette nouvelle conduite, contraint par la topographie du site, est détaillé dans le paragraphe "Conduite forcée" et dans le plan de situation (Annexe 1).

Son diamètre est déterminé ici de manière à limiter la perte de charge, c'est-à-dire à assurer **un rendement de conduite d'au moins 90 % au débit d'équipement**, ce qui correspond à un niveau de rendement comparable à celui des autres équipements (turbine et alternateur).

Le calcul de la perte de charge dans la conduite, basé sur la formule de Colebrook utilise l'équation suivante:

$$H_r = K_{Hr} \cdot Q_t^2 \quad (1)$$

avec:  $H_r$  = perte de charge [m]

$K_{Hr}$  = coefficient global de perte de charge, fonction du diamètre interne de la conduite et de la rugosité [ $s^2/m^5$ ]

$Q_t$  = débit turbiné [ $m^3/s$ ]

Les calculs sont réalisés avec une rugosité de 0.1 mm, ce qui correspond à une conduite en acier en fonctionnement depuis plusieurs années.





Les données et résultats sont résumés dans le Tableau 1, selon différentes variantes de diamètre interne standard de conduite forcée en acier.

Variantes		A	B	C	D	E
<b>Diamètre interne</b>	<b>mm</b>	<b>500</b>	<b>400</b>	<b>350</b>	<b>300</b>	<b>250</b>
Matériau	m	acier	acier	acier	acier	acier
Longueur	m	1096	1096	1096	1096	1096
Dénivellation	m	184	184	184	184	184
Rugosité	mm	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Coefficient de perte de charge	$m^2/s^5$	45	140	280	620	1620
<b>Débit d'équipement, <math>Q_n</math></b>	<b>l/s</b>	<b>500</b>	<b>350</b>	<b>250</b>	<b>160</b>	<b>100</b>
Perte de charge à $Q_n$	m	11	17	18	16	16
Rendement de la conduite	%	94	91	90	91	91

Tableau 1. Perte de charge pour chaque variante de diamètre interne de conduite

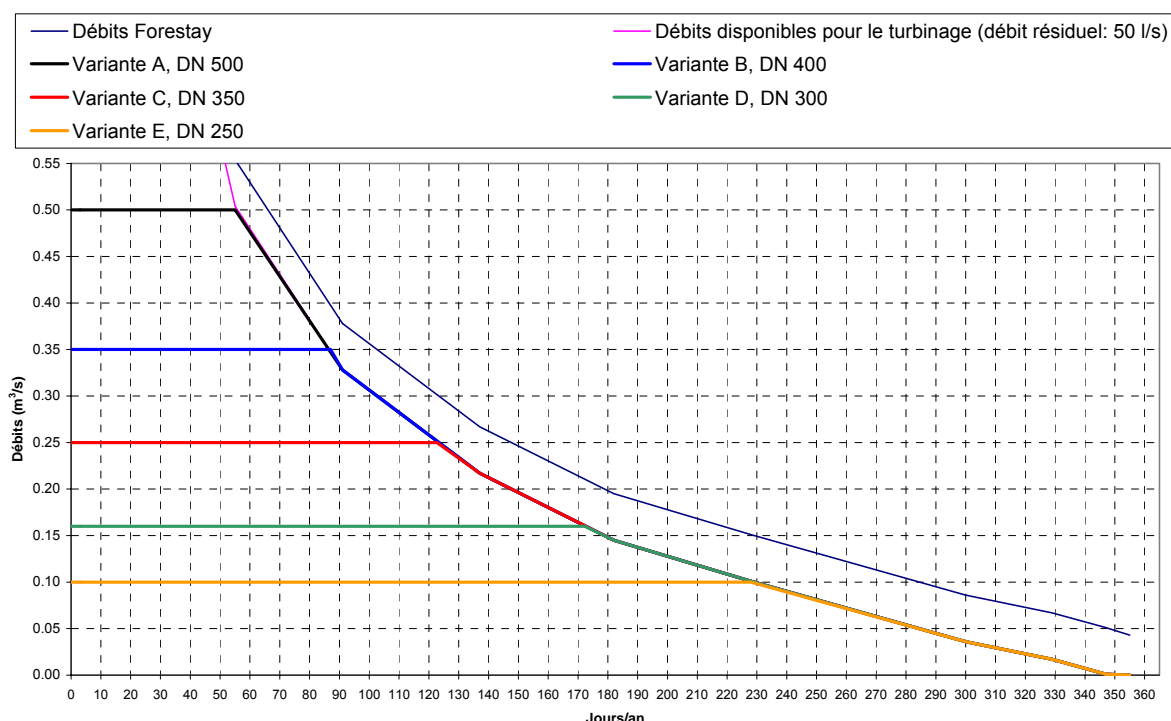


Figure 3. Courbes des débits classés pour les différentes variantes de diamètre de conduite

La **variante A** correspond au débit d'équipement maximal de **500 l/s**, pour laquelle une conduite en **DN 500** serait nécessaire.

La **variante B** correspond à un diamètre interne de conduite de **400 mm**, et à un débit d'équipement de **350 l/s**, atteint ou dépassé plus de 85 jours dans l'année.

La **variante C** correspond à un diamètre interne de conduite de **350 mm**, et à un débit d'équipement de **250 l/s**, atteint ou dépassé plus de 120 jours dans l'année.

Les **variantes D et E**, correspondant à des débits d'équipement atteints ou dépassés plus de 170 jours dans l'année, et inférieurs à celui de 180 l/s de la centrale existante, ne seront pas étudiées ici.

Finalement, seules les **variantes A, B et C**, correspondant à des conduites en **DN 500, 400 et 350** seront retenues pour la suite de l'étude.



## Principales dimensions de la turbine

Le tableau suivant donne, pour les trois variantes de conduite, un compromis intéressant en terme de taille de machine, de flexibilité selon les débits et de coûts.

Variantes		A	B	C
<b>Débit d'équipement, <math>Q_N</math></b>	<b>l/s</b>	<b>500</b>	<b>350</b>	<b>250</b>
Dénivellation	m	184	184	184
Diamètre interne de la conduite, DN	mm	500	400	350
Chute nette à $Q_N$	m	173	167	167
Energie massique à $Q_N$	J/kg	1'694	1'636	1'633
Type de turbine		Pelton à axe vertical*		
Nombre d'injecteurs	(-)	3	3	3
<b>Vitesse de rotation</b>	<b>t/min</b>	<b>750</b>	<b>750</b>	<b>1000</b>
Diamètre externe de roue, $D_e$	mm	914	862	667
Diamètre du bâti, $D_c$	mm	2'200	2'070	1'610
Largeur d'auget, $B_2$	mm	202	168	144
Diamètre d'injection, $D_1$	mm	703	691	517
Nombre d'augets	(-)	21	22	21
Puissance hydraulique	kW	847	573	408
<b>Puissance mécanique maximale à l'accouplement</b>	<b>kW</b>	<b>763</b>	<b>515</b>	<b>368</b>

Tableau 2. Caractéristiques de la turbine pour les différentes variantes de conduite (\*: Annexe 7)

Pour un même nombre d'injecteurs, les dimensions de la turbine de la variante B sont relativement similaires à celles de la variante A. La différence de coût sera donc faible.

Par contre, la turbine de la variante C, correspondant à une vitesse de rotation de 1000 t/min est significativement plus petite que celles des variantes A et B. La différence de coût sera donc plus importante.

La Figure 4 montre l'évolution du rendement en fonction du débit turbiné pour les 3 variantes. Ce rendement de turbine est issu des mesures effectuées en laboratoire sur une turbine MHyLab à 3 injecteurs et axe vertical.



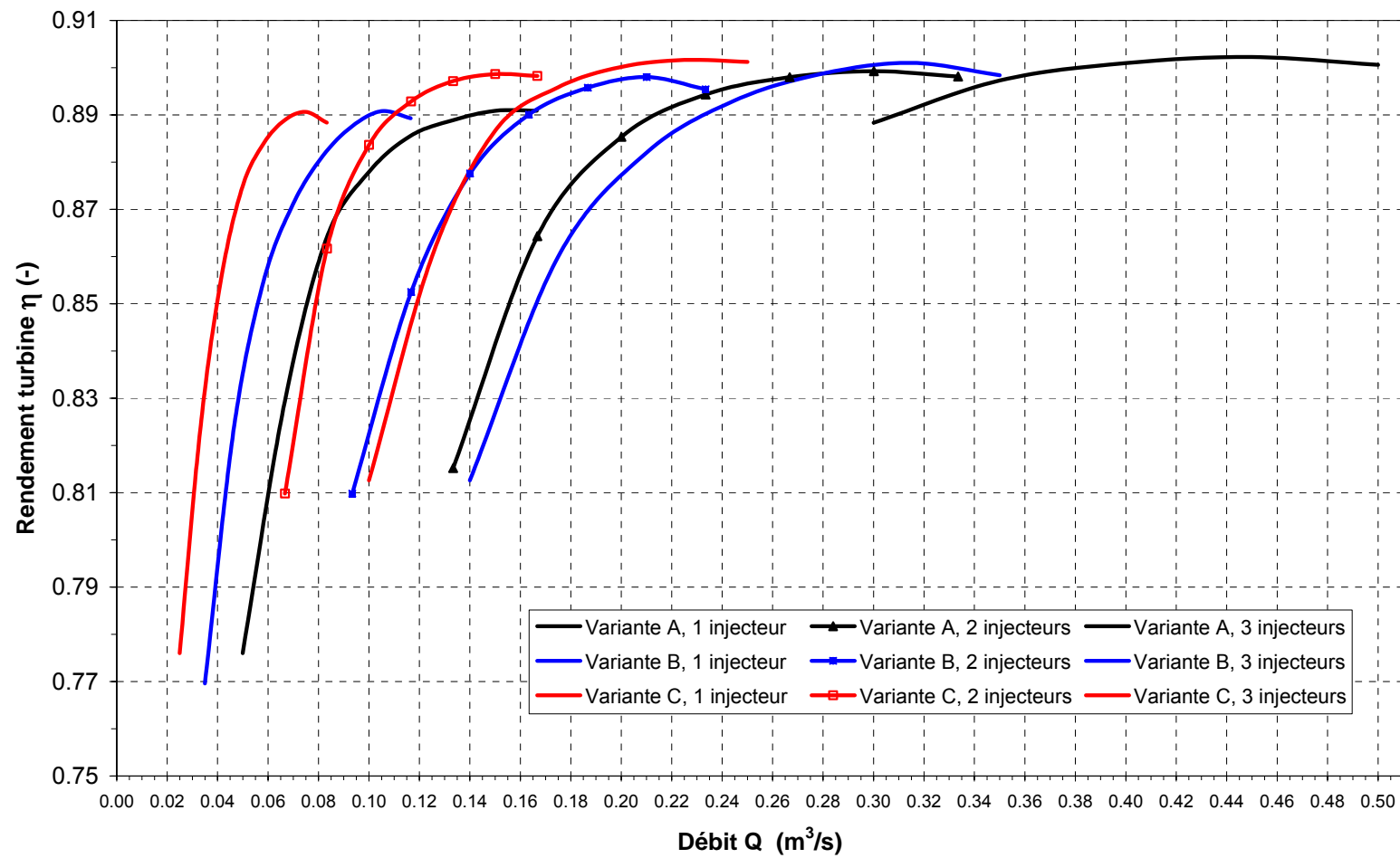


Figure 4. Rendement mécanique à l'accouplement en fonction du débit turbiné pour les 3 variantes de diamètre de conduite



## Calcul de la production

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

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

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

$Q_t$  = débit turbiné [m<sup>3</sup>/s]

$\eta(Q_t)$  = produit des rendements de la turbine et de l'alternateur, fonction du débit [-]

$H(Q_t)$  = chute nette fonction du débit turbiné, calculée par l'équation (1) [m]

Le rendement de la turbine, pour chaque variante, est donné à la Figure 4.

Le rendement prévisible de l'alternateur est donné à la figure suivante.

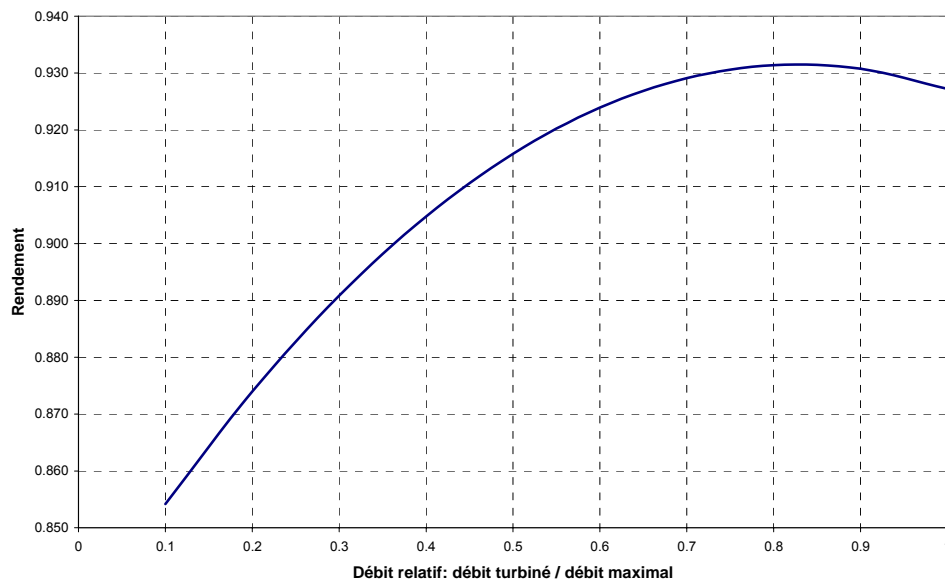


Figure 5. Courbe- type de rendement de l'alternateur

La Figure 6 donne le graphe des puissances classées pour les différentes variantes, la surface entre les axes et les courbes représentant les productions électriques en kWh/an.



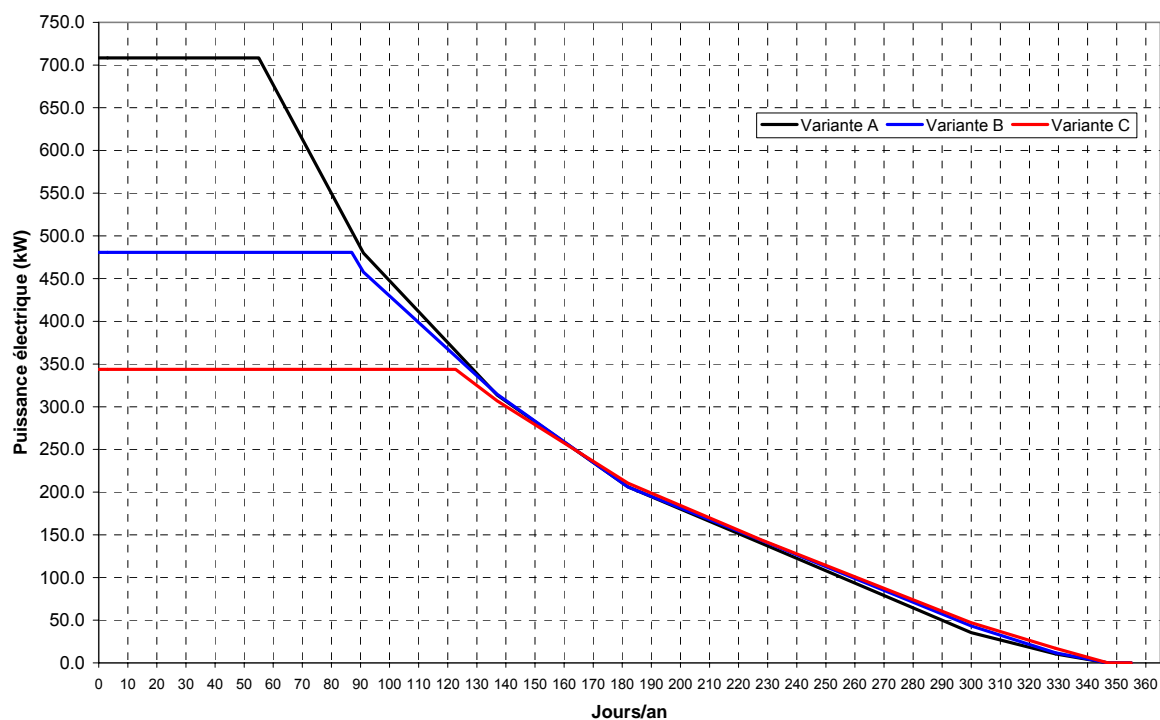


Figure 6. Courbes des puissances classées pour les différentes variantes de conduite

Variantes		A	B	C
<b>Débit d'équipement</b>	<b>l/s</b>	<b>500</b>	<b>350</b>	<b>250</b>
Chute brute	m	184	184	184
Diamètre interne de conduite	mm	500	400	350
Chute nette au débit d'équipement	m	173	167	167
Puissance hydraulique	kW	847	573	408
Energie hydraulique	kWh/an	3'112'000	2'596'000	2'158'000
Puissance mécanique maximale à l'accouplement	kW	763	515	368
<b>Puissance électrique maximale</b>	<b>kW</b>	<b>707</b>	<b>477</b>	<b>341</b>
<b>Production électrique</b>	<b>kWh/an</b>	<b>2'526'000</b>	<b>2'121'000</b>	<b>1'780'000</b>
Rendement de l'installation	%	81	82	82

Tableau 3. Production électrique pour chaque variante

La variante B avec un débit d'équipement de 350 l/s implique une perte de production par rapport à la variante A à 500 l/s de l'ordre des 16 %, tandis que cette perte est d'environ 30 % pour la variante C à 250 l/s.

## Etude économique

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

Tous les coûts sont donnés hors taxe.

## INVESTISSEMENTS

### Investissement en électromécanique

En électromécanique, l'estimation des coûts, résumée dans le Tableau 4 et le Tableau 5, a été faite en se basant:



- sur une offre budgétaire d'un constructeur de petites turbines datée du 21.03.07, pour le turbogroupe comprenant: la sonde de niveau, la vanne de garde, le répartiteur, le bâti, la roue, l'alternateur et le contrôle-commande,
- sur une offre budgétaire de Romande Energie, datée du 26.02.07 (cf. Annexe 4) pour les coûts de raccordement électrique.

Variante		A	B	C
Coût du turbogroupe	CHF	736'000	620'000	457'000

Tableau 4. Investissement pour le turbogroupe (raccordement non inclus)

Ainsi, il s'avère que la diminution du coût par rapport à la variante A est de 16 % pour la variante B, et de 38 % pour la variante C.

Compte tenu des fluctuations du coût de la matière (et plus spécifiquement du fer, du nickel et du cuivre), ces chiffres sont susceptibles de varier dans le temps.

Les coûts de raccordement électrique, détaillés dans le Tableau 5, comprennent:

- une finance d'équipement, proportionnelle à l'ampérage supplémentaire, l'actuel s'élevant à 160 A,
- le remplacement de la ligne basse tension actuelle en une ligne moyenne tension (20 kV) jusqu'à la station transformatrice de Rivaz,
- l'installation d'une station transformatrice 400 V / 20 kV au niveau du local de turbinage.

Variante		A	B	C
Nouvel ampérage	A	1250	800	600
Ampérage actuel	A	160	160	160
Ampérage supplémentaire	A	1090	640	440
Finance d'équipement	CHF/A	195	195	195
Montant total de la finance d'équipement	CHF	213'000	125'000	86'000
Génie civil	CHF	35'000	35'000	35'000
Nouvelle station transformatrice	CHF	75'000	75'000	75'000
Câble (démontage câble BT, nouveau câble MT)	CHF	40'000	40'000	40'000
Installation provisoire pour maintien des antennes	CHF	5'000	5'000	5'000
<b>Total pour le raccordement électrique</b>	<b>CHF</b>	<b>368'000</b>	<b>280'000</b>	<b>241'000</b>

Tableau 5. Investissement pour le raccordement électrique

Variante		A	B	C
Investissement en électromécanique	CHF	1'104'000	900'000	698'000

Tableau 6. Investissement en électromécanique (turbogroupe complet et raccordement électrique)

Ainsi, il s'avère que la diminution de l'investissement en électromécanique par rapport à la variante A est de 18 % pour la variante B, et de 37 % pour la variante C.

### Investissement en génie civil

Se reporter à la description détaillée des travaux de génie civil au paragraphe "Génie civil", aux plans et au devis de génie civil (Annexe 1, Annexe 2, Annexe 3 et Annexe 5).

Le Tableau 7 présente les investissements de génie civil, sans inclure la conduite forcée, communs à chaque variante A, B et C.



Prise d'eau	17'000
Centrale de turbinage	60'000
Démolition de l'ancienne conduite et de la prise d'eau	40'500
Démolition de la centrale actuelle	15'000
<b>Investissement en génie civil (sans les conduites)</b>	<b>132'500</b>

Tableau 7. Investissement (CHF) en génie civil, sans inclure la conduite forcée

En ce qui concerne la conduite forcée, vu les coûts et les possibilités réelles de construction, plusieurs variantes d'emplacement ont été étudiées, dont les coûts, pour la variante B en DN 400, sont résumés dans le Tableau 8. Pour les autres diamètres internes de conduite, les coûts sont les suivants:

- Variante C ou conduite en DN 350: moins value de 100 CHF/m,
- Variante A ou conduite en DN 500: plus value de 150 CHF/m.

Cas	Installation de la conduite	Coût de la conduite DN 400 (matière et pose) CHF/m
I	Conduite enterrée dans le lit de la rivière	1'600
II	Conduite apparente posée sur socles	1'700 (ou 1600*)
III	Conduite enterrée dans les berges	800
III	Conduite enterrée sous la route	1'100
IV	Forage dirigé pour le passage des chutes	Non évalué
V	Au passage des chutes, conduite enterrée ou contre les rochers	3'500
V	Au passage des chutes, conduite hors sol	4'500

Tableau 8. Résumé des coûts (CHF/m) de la conduite forcée DN 400 selon différentes variantes (\*: pour les tronçons moins contraignants) (se reporter au devis détaillé à l'Annexe 5)

Vu la topographie des lieux, les points suivants ont été pris en compte dans les devis :

- Peu ou pas d'accès tout au long de la rivière,
- Travaux exécutés dans un cours d'eau,
- Difficultés de passage des chutes avec la conduite,
- Travail par étapes de part et d'autre des chutes,
- Acheminement des matériaux le long de la rivière.

Les coûts pour les trois tracés de conduite retenus entre la nouvelle prise d'eau et le local de turbinage sont résumés dans les tableaux suivants.

Tracé		1	2	3
Variante A: Conduite en DN 500	CHF/m	2'500	2'560	1'950
Variante B: conduite en DN 400	CHF/m	2'350	2'410	1'800
Variante C: conduite en DN 350	CHF/m	2'250	2'310	1'700

Tableau 9. Résumé des coûts moyens (CHF/m) de la conduite suivant son diamètre interne et son tracé entre la prise d'eau et le local de turbinage

Il s'avère que les tracés 1 et 2 sont assez similaires en terme de coûts, à ce stade de l'étude. Toutefois, il est noté que le tracé 1 correspond à une conduite plus à même de répondre aux contraintes esthétiques du site, puisque celle-ci sera plus souvent cachée.

Le tracé 3 est la variante la moins coûteuse: il comprend plus de tronçons enterrés que le tracé 2, ce



qui est positif en terme d'intégration dans le paysage, mais impose d'utiliser des terrains privés. Le coût de ces démarches supplémentaires n'est pas inclus dans le devis.

Tracé		1	2	3
Variante A: Conduite en DN 500	CHF	2'737'000	2'807'000	2'137'000
Variante B: conduite en DN 400	CHF	2'573'000	2'643'000	1'973'000
Variante C: conduite en DN 350	CHF	2'463'000	2'533'000	1'863'000

*Tableau 10. Résumé des coûts totaux de la conduite suivant son diamètre interne et son tracé entre la prise d'eau et le local de turbinage*

Tracé		1	2	3
Variante A	CHF	2'869'500	2'939'500	2'269'500
Variante B	CHF	2'705'500	2'775'500	2'105'500
Variante C	CHF	2'595'500	2'665'500	1'995'500

*Tableau 11. Investissements totaux (prise d'eau, conduite, centrale, démolitions) en génie civil suivant les variantes de diamètre et de tracé de conduite*

Finalement, la variante C (correspondant à un débit d'équipement de 250 l/s) et le tracé de conduite 3 (en privilégiant une conduite enterrée dans les berges) apparaît être la variante la moins coûteuse en terme de génie civil.

### Autres investissements

Les frais d'ingénierie sont estimés à **10 %** de l'investissement total (électromécanique et génie civil) de même que les divers et imprévus.

### FRAIS D'EXPLOITATION

Les frais d'exploitation, comprenant les coûts de maintenance, d'entretien courant (soit de l'ordre de 4 heures par semaine) et divers frais (consommation d'énergie, assurances) sont estimés à partir d'installations similaires et fixés à 40'000 CHF quelle que soit la variante.

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.-.

### CALCULS ÉCONOMIQUES

Les calculs économiques prennent en compte les éléments suivants:

- La **valeur résiduelle** de la centrale actuelle, est fixée à **CHF 180'000.-**, à amortir sur 20 ans.
- L'analyse économique se base sur un remboursement de l'emprunt par annuités constantes.
- Le **taux d'intérêt** considéré dans cette étude est de **4 %**., taux que l'on peut considérer comme prudent sur le moyen terme.
- Le modèle économique se base sur un remboursement de l'emprunt par annuités constantes.
- L'étude économique se base sur un coefficient d'annuité pondéré, en prenant en compte les **durées d'amortissement** suivantes:
  - 25 ans pour l'électromécanique,
  - 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 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 prix de revient du kWh est déterminé en divisant la somme des frais annuels (annuité fixe et frais d'exploitation) par la production électrique annuelle, et a été calculé en considérant une année moyenne.

Les 3 tableaux suivants résument les résultats des calculs économiques pour les 3 tracés de conduite retenus.

Type de tracé de conduite		Tracé 1		
Variantes		A	B	C
Electromécanique	CHF	1'104'000	900'000	698'000
Génie civil centrale + conduite forcée	CHF	2'869'500	2'705'500	2'595'500
Frais d'ingénierie	CHF	397'000	351'000	323'000
Divers et imprévus	CHF	397'000	351'000	323'000
Valeur résiduelle de la centrale actuelle	CHF	180'000	180'000	180'000
<b>Investissement total</b>	<b>CHF</b>	<b>4'947'500</b>	<b>4'487'500</b>	<b>4'119'500</b>
Frais d'exploitation standard	CHF/an	40'000	40'000	40'000
Production annuelle	MWhe/an	2'526	2'121	1'780
Chiffre d'affaire brut	CHF/an	379'000	318'000	267'000
Taux d'intérêt	%	4.0	4.0	4.0
Coefficient d'annuité pondéré	%	5.5	5.4	5.4
Annuité	CHF/an	273'000	247'000	225'000
<b>Bénéfice annuel</b>	<b>CHF/an</b>	<b>66'000</b>	<b>31'000</b>	<b>2'000</b>
<b>Prix de revient</b>	<b>cts/kWh</b>	<b>12.4</b>	<b>13.5</b>	<b>14.9</b>

Tableau 12. Calculs économiques pour le tracé 1

Type de tracé de conduite		Tracé 2		
Variantes		A	B	C
Electromécanique	CHF	1'104'000	900'000	698'000
Génie civil centrale + conduite forcée	CHF	2'939'500	2'775'500	2'665'500
Frais d'ingénierie	CHF	404'000	358'000	330'000
Divers et imprévus	CHF	404'000	358'000	330'000
Valeur résiduelle de la centrale actuelle	CHF	180'000	180'000	180'000
<b>Investissement total</b>	<b>CHF</b>	<b>5'031'500</b>	<b>4'571'500</b>	<b>4'203'500</b>
Frais d'exploitation standard	CHF/an	40'000	40'000	40'000
Production annuelle	MWhe/an	2'526	2'121	1'780
Chiffre d'affaire brut	CHF/an	379'000	318'000	267'000
Taux d'intérêt	%	4.0	4.0	4.0
Coefficient d'annuité pondéré	%	5.5	5.4	5.4
Annuité	CHF/an	277'000	251'000	229'000
<b>Bénéfice annuel</b>	<b>CHF/an</b>	<b>62'000</b>	<b>27'000</b>	<b>-2'000</b>
<b>Prix de revient</b>	<b>cts/kWh</b>	<b>12.5</b>	<b>13.7</b>	<b>15.1</b>

Tableau 13. Calculs économiques pour le tracé 2



Type de tracé de conduite		Tracé 3		
Variantes		A	B	C
Electromécanique	CHF	1'104'000	900'000	698'000
Génie civil centrale + conduite forcée	CHF	2'269'500	2'105'500	1'995'500
Frais d'ingénierie	CHF	337'000	301'000	269'000
Divers et imprévus	CHF	337'000	301'000	269'000
Valeur résiduelle de la centrale actuelle	CHF	180'000	180'000	180'000
<b>Investissement total</b>	<b>CHF</b>	<b>4'227'500</b>	<b>3'787'500</b>	<b>3'411'500</b>
Frais d'exploitation standard	CHF/an	40'000	40'000	40'000
Production annuelle	MWhe/an	2'526	2'121	1'780
Chiffre d'affaire brut	CHF/an	379'000	318'000	267'000
Taux d'intérêt	%	4.0	4.0	4.0
Coefficient d'annuité pondéré	%	5.5	5.5	5.5
Annuité	CHF/an	236'000	211'000	188'000
<b>Bénéfice annuel</b>	<b>CHF/an</b>	<b>103'000</b>	<b>68'000</b>	<b>39'000</b>
<b>Prix de revient</b>	<b>cts/kWh</b>	<b>10.9</b>	<b>11.8</b>	<b>12.8</b>

Tableau 14. Calculs économiques pour le tracé 3

En considérant le prix de rachat actuel de 15 cts/kWh pour l'électricité issue des petites centrales, toutes les variantes étudiées s'avèrent être rentables.

Il est à noter que plus le débit d'équipement de la turbine est élevé, plus bas est le prix de revient. Ainsi, la variante à 500 l/s, correspondant à une conduite DN 500 est la plus intéressante économiquement.

De plus, il s'avère que les tracés 1 et 2 correspondent à des prix de revient similaires, tandis que le tracé 3 en permet une réduction non négligeable.

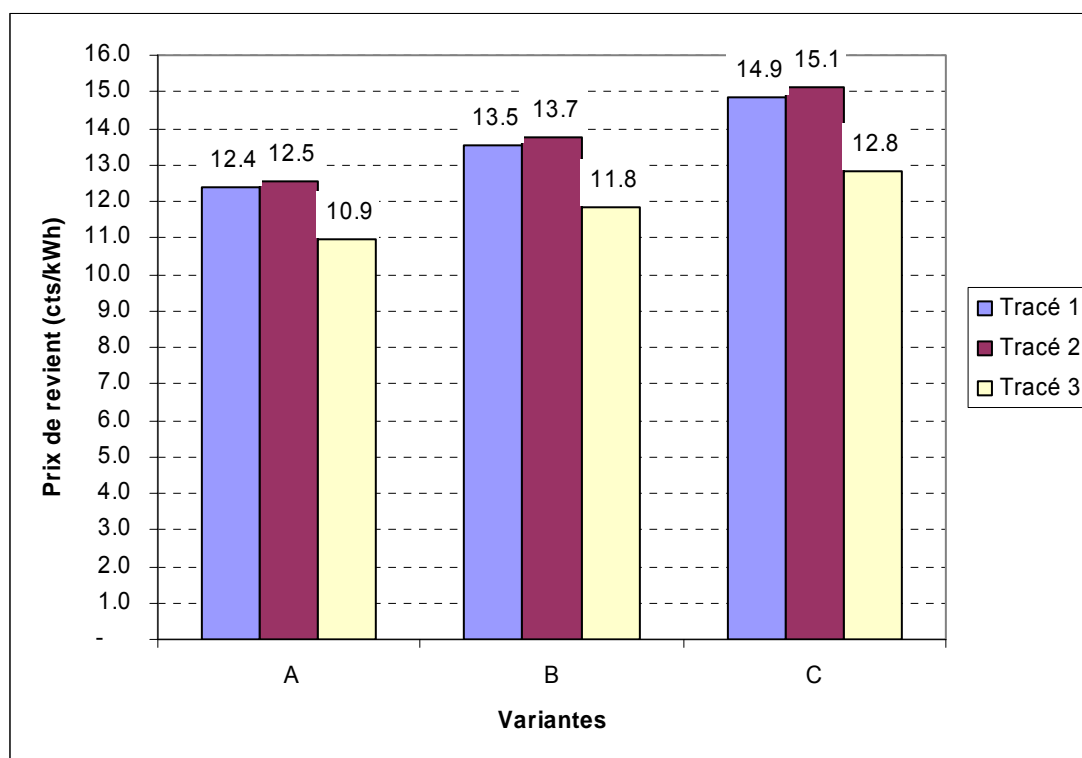


Figure 7. Comparaison des prix de revient pour les variantes A, B, C définies par des débits d'équipement différents, selon le tracé de la conduite retenu



Face aux prix de revient, la **variante A** et le **tracé 3** sont retenus dans la suite de l'étude, avec un prix de revient de **10.9 cts/kWh**, et un investissement d'environ **4'230'000 CHF**.

### Principales caractéristiques de la variante retenue

Variante		A
Niveau d'eau amont	m	559
Niveau de la turbine	m	375
Dénivellation	m	184
Débit résiduel	m <sup>3</sup> /s	0.050
Débit d'équipement	m <sup>3</sup> /s	0.500
Diamètre interne de conduite	mm	500
Longueur de la conduite	m	1'096
Coefficient de perte de charge	s <sup>2</sup> /m <sup>5</sup>	45
Chute nette au débit d'équipement	m	173
Puissance hydraulique	kW	847
Energie hydraulique	kWh/an	3'112'000
Energie massique à Q <sub>N</sub>	J/kg	1'694
Type de turbine		Pelton, axe vertical
Nombre d'injecteurs	(-)	3
Vitesse de rotation	t/min	750
Diamètre externe de roue, D <sub>e</sub>	mm	914
Diamètre du bâti, D <sub>c</sub>	mm	2'200
Largeur d'auget, B <sub>2</sub>	mm	202
Diamètre d'injection, D <sub>1</sub>	mm	703
Nombre d'augets	(-)	21
Puissance mécanique maximale à l'accouplement	kW	763
Puissance électrique maximale	kW	707
Production électrique	kWh/an	2'526'000
Rendement de l'installation	%	81

Tableau 15. Caractéristiques techniques de la variante A

Tronçons de conduite depuis la prise d'eau jusqu'au local de turbinage	Longueur	Tracé 3	
	m	cas	description
Tronçon village	56	II	sur socles
Chute du chemin du Moulin	80	V	hors sol
Tronçon en forêt	300	III	berges
Chute Le Monaud	150	V	enterrée
Tronçon vignes	100	III	berges
Tronçon route	200	III	route
Tronçon Rivaz	100	II	sur socles
Chute route cantonale	80	V	contre rocher
Tronçon sous la route cantonale	30	II	sur socles

Tableau 16. Description des tronçons composant la conduite de la variante A: tracé 3



Tracé de conduite		3
Variante		A
Turbogroupe	CHF	736'000
Raccordement électrique	CHF	368'000
Génie civil centrale + prise d'eau + démolition	CHF	132'500
Génie civil conduite	CHF	2'137'000
Valeur résiduelle de l'installation actuelle	CHF	180'000
Frais d'ingénierie	CHF	337'000
Divers et imprévus	<b>CHF</b>	337'000
<b>Investissement total</b>	<b>CHF</b>	<b>4'227'500</b>
Frais d'exploitation standard	CHF/an	40'000
Production annuelle	MWhe/an	2'526
Taux d'intérêt	%	4.0
Coefficient d'annuité pondéré	%	5.5
Annuité	CHF/an	236'000
<b>Bénéfice annuel</b>	<b>CHF/an</b>	<b>103'000</b>
<b>Prix de revient</b>	<b>cts/kWh</b>	<b>10.9</b>

Tableau 17. Résumé des calculs économiques pour la variante retenue

## Description technique de la variante retenue

### PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'INSTALLATION DE TURBINAGE

La régulation de la turbine sera asservie à la mesure de niveau amont effectuée à la 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.
- Lorsque le niveau d'eau, supérieur à celui de consigne, continue à augmenter, la turbine s'ouvre progressivement.
- Lorsque le niveau d'eau, supérieur à celui de consigne, diminue, la turbine se ferme progressivement.

### TURBINE

Les indications pour la turbine, présentées dans ce rapport, sont fournies à titre indicatif et peuvent légèrement varier en fonction du constructeur choisi.

On utilisera autant que possible l'acier inoxydable pour la construction de la turbine. Toutefois, le bâti pourra être en acier noir revêtu.

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

On utilisera de préférence une construction à augets rapportés, usinés en CNC (commande numérique), fixés entre deux flasques. Cette méthode permet un changement partiel de la roue en cas de dégâts éventuels dus à des matériaux solides transportés par l'eau. De plus, elle assure une parfaite similitude entre le profil hydraulique développé en laboratoire et celui usiné, chose difficilement réalisable (voire impossible) avec une roue coulée d'une pièce, l'espace étant insuffisant pour la finition par meulage. Par ailleurs, nous préconisons l'utilisation de barreaux forgés, dont les caractéristiques mécaniques sont bien supérieures à celles d'un métal coulé.

En outre, nous recommandons une commande des injecteurs par vérin électrique, par rapport aux



systèmes à huile, plus coûteux et pouvant entraîner des fuites.

Chaque injecteur comportera un déflecteur afin d'assurer la sécurité en cas de déclenchement, dû, par exemple, à une perte de réseau. Le rôle de ce déflecteur est de dévier le jet de la roue, et donc d'éviter que la turbine ne parte à l'emballement.

## VANNES

Les vannes à installer sont les suivantes:

- A la prise d'eau: une vanne de tête, de manière à pouvoir isoler la conduite en cas de révision,
- Au niveau du local de turbinage: une vanne de révision de la turbine, qui sera de type sphérique DN 500, PN 20, équipée d'un by-pass, laissant ainsi le passage totalement libre dans la conduite, et dont la manœuvre sera manuelle.

## ALTERNATEUR

Variante		A
Type		Synchrone
Fréquence	Hz	50
Tension triphasée aux bornes	V	400
Vitesse nominale	min <sup>-1</sup>	750
Puissance électrique maximale	kW	708
Cos $\varphi$		0.90
Puissance apparente maximale	kVA	800

Tableau 18. Caractéristiques de l'alternateur

Les paliers seront à roulement 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  $\varphi$  incorporé à la machine.

Il est à noter que les délais de livraison actuels des alternateurs sont de 12 à 18 mois.

## RACCORDEMENT ÉLECTRIQUE

Jusqu'en 2005, la centrale de 80 kW était reliée par une ligne aérienne en moyenne tension (20 kV) à la station transformatrice de la commune de Rivaz. En 2005, cette ligne a été remplacée par une ligne enterrée en basse tension (400 V).

Le câble existant, d'une section de 240 mm<sup>2</sup>, d'un ampérage maximal de 300 A ne convient pas à la nouvelle puissance de la machine. Un nouveau câble devra donc être posé en moyenne tension (20 kV), de manière à relier le turbogroupe à la station transformatrice de Rivaz. Par conséquent, une station transformatrice 400 V / 20 kV sera installée dans la centrale.

## SÉCURITÉ

La sécurité est assurée par les déflecteurs de la turbine, en cas de déclenchement, ceux-ci s'ouvriront et les pointeaux se fermeront.

## CONTRÔLE COMMANDE

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

La régulation sera asservie au niveau d'eau amont.

La turbine devra pouvoir 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.



Le choix du redémarrage manuel ou automatique de la centrale, en cas d'arrêt consécutif à une alarme, sera à discuter avec l'exploitant.

Les tableaux comprendront en outre les éléments suivants :

- Commande des injecteurs avec affichage de l'ouverture,
- Réglage de  $\cos \varphi$ .

Les indicateurs suivants seront à fournir :

- Voltmètre, wattmètre, fréquencemètre, mesure du  $\cos \varphi$ , synchronoscope, compte tour,
- Indicateur de niveau amont,
- Indicateur de charges des batteries de secours,
- Compteur d'heures, compteur de démarrage,
- Températures des roulements et du bobinage de l'alternateur,
- Arrêt d'urgence.

Les alarmes suivantes devront être traitées :

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

Le groupe comprendra ses propres armoires de commande.

Le contrôle commande sera alimenté en 24 V CC ou 48 V CC et secouru par des batteries.

## **GÉNIE CIVIL**

### **Prise d'eau**

Se référer au plan de l'Annexe 3.

Une prise d'eau, de type Coanda, sera installée dans la partie canalisée du Forestay au niveau de la station de mesures des débits, juste après une petite chute. Une grille sera mise en place dans le cours d'eau dans le prolongement de la chute, à travers laquelle l'eau s'écoulera, par gravité, dans le système de mise en charge de la conduite forcée.

Une grande partie des particules suspendues, dont la vitesse est augmentée sur le plateau d'accélération constitué par la grille, passe au-dessus du plan, produisant ainsi une excellente protection de la turbine. La vie aquatique est également protégée puisque les poissons ne sont pas entraînés dans la conduite forcée.

Cet ouvrage sera en béton armé avec une grille inoxydable, et sera construit sur toute la largeur du lit de la rivière.





*Photo 3. Emplacement de la prise d'eau*



*Photo 4. Exemple de prise d'eau Coanda*

### **Conduite forcée**

Pour des raisons esthétiques, il serait idéal que l'ensemble de la conduite soit enterré sur toute la longueur du tronçon.

Cependant vu les coûts et les possibilités réelles de construction, plusieurs variantes d'emplacement de la conduite forcée ont été étudiées :

- CAS I : conduite enterrée dans le lit de la rivière
- CAS II : conduite apparente posée sur socles
- CAS III : conduite enterrée dans les berges ou sous la route.
- CAS IV : forage dirigé pour le passage des chutes



- CAS V : au passage des chutes verticales, conduite enterrée derrière des murs existants ou à construire afin de cacher celle-ci.

Un mélange de ces différents cas suivant les tronçons peut être envisagé afin de favoriser soit l'intégration dans le paysage soit la limitation des coûts.

Ces travaux devront être réalisés en période d'étiage, ou selon les directives des services concernés en matière de faune et de flore.

Les difficultés de cette réalisation sont les accès au bord de la rivière et le passage des chutes, afin de ne pas endommager les abords.

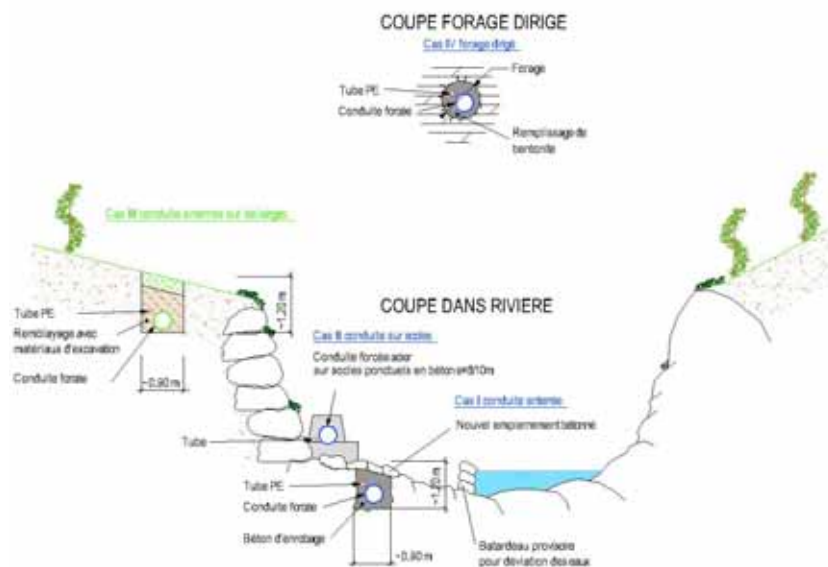


Figure 8. Différentes variantes d'emplacement de la conduite forcée (cf. Annexe 3)

#### Cas I: conduite enterrée dans le lit de la rivière

La conduite sera enterrée à environ 1 mètre de profondeur sous le niveau du lit de la rivière, de préférence vers le bord où l'écoulement est le moins fort. Les eaux de la rivière devront être déviées par un batardeau ou raccordées dans une conduite de déviation provisoire à l'emplacement du chantier. Ces travaux se feront par étapes, afin de pouvoir restituer le plus rapidement la rivière.

La fouille se fera principalement au brise-roche, car le fond de la rivière est en majeure partie constitué de rocher. Les matériaux ainsi excavés seront sortis du lit et évacués en décharge. Si quelques blocs de rocher sortent entiers du terrassement, ceux-ci seront réutilisés pour refaire le lit de la rivière sur la largeur de la fouille.

Une surface en béton sera réalisée au fond de la fouille afin de pouvoir poser et caler la conduite forcée. Celle-ci sera ensuite complètement bétonnée au lieu d'être enrobée de sable ou autres matériaux graveleux, ceci afin de ne pas créer une tranchée drainante des eaux de sous-sol ou de la rivière qui pourrait s'infiltrer par des failles dans cette fouille. Une petite conduite PE sera également mise en place pour permettre la pose d'une fibre optique entre la prise d'eau et la centrale.

Le lit de la rivière sera reconstitué d'enrochements bétonnés qui seront rapportés ou provenant des fouilles.







*Photo 5. Tronçon des vignes (cf. Annexe 1)*

#### *Cas II: conduite posée sur socles dans le lit de la rivière*

La conduite sera apparente et posée sur des socles en béton armé, comme la conduite existante située dans la partie inférieure. Elle sera placée contre un bord de la rivière, et suffisamment haute afin de la protéger au maximum des crues et des matériaux que le cours d'eau pourrait charrier. La conduite sera en acier et assemblée sur place par tronçons.

Les socles situés aux différents coudes sont prévus bétonnés sur place. La fondation sera posée sur la roche existante, ou ancrée selon la nature du sol. Lorsque la conduite est mise en place, un enrobage béton autour de celle-ci assure la liaison à la fondation. Une variante pourrait être de la brider sur la fondation. Les éléments en béton des fondations existantes peuvent être partiellement récupérés.



*Photo 6. Conduite actuelle posée sur socle (cf. Annexe 1)*

Pour les cas I et II, la grande difficulté est l'acheminement des matériaux de construction dans le lit de la rivière et sur les tronçons inaccessibles par véhicules, ce qui renchérit passablement le projet.

#### *Cas III: Conduite enterrée sur les berges*

Afin de réduire les interventions dans le cours d'eau impliquant la déviation des eaux et le bétonnage, une variante serait de pouvoir construire cette conduite hors de l'emprise de la rivière, ce qui nécessite des conventions de passage chez des privés, mais simplifierait les travaux.

La conduite serait posée en terre dans la forêt ou au bord des vignes, il ne devrait pas y avoir de rocher. Les matériaux d'excavation pourront ainsi être remis en place pour le remblayage. La conduite en fonte sera protégée extérieurement de ciment, permettant ainsi un enrobage avec des matériaux d'excavation.





*Photo 7. Chute le Monaud (cf. Annexe 1)*

Pour la partie de la conduite située sous la route en béton existante, celle-ci sera bétonnée et de la grave sera remise en place sous la chaussée.

#### *Cas IV: passage des chutes par forage dirigé*

Une variante pour le passage des chutes serait de passer avec un forage ou un micro-tunnelier. De nouvelles méthodes de travail se sont passablement développées ces dernières années, l'une d'elles consiste à réaliser un « forage dirigé ».

Il s'agit d'une technique dérivée des forages pétroliers qui trouve son application dans des traversées critiques telles que routes, voies CFF ou rivières. Le forage comporte plusieurs étapes :

- Réalisation d'un trou pilote guidé par un train de tige piloté depuis la foreuse.
- Injection depuis la tête de boue de forage afin de ne pas déstabiliser le sol.
- Alésage du forage pilote par plusieurs passages jusqu'à l'obtention du diamètre désiré.
- Tirage des canalisations et tubes depuis le bas.
- Injection de bentonite afin de remplir les vides

Ces travaux peuvent être également réalisés dans des sols rocheux. Une surface pour la cellule de forage et d'installation de chantier doit être trouvée pour chaque passage des chutes. Celle-ci risque de se situer chez des privés.



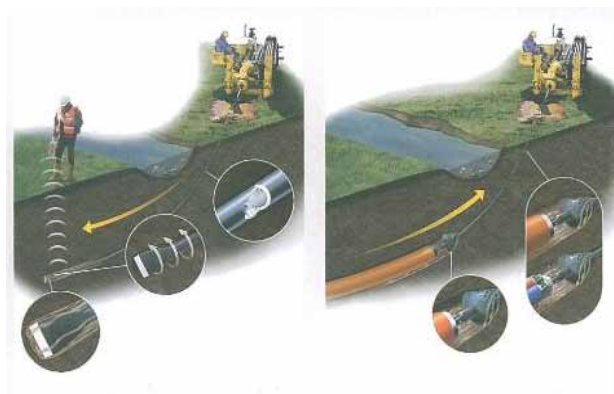


Figure 9. Illustrations de principe du forage dirigé

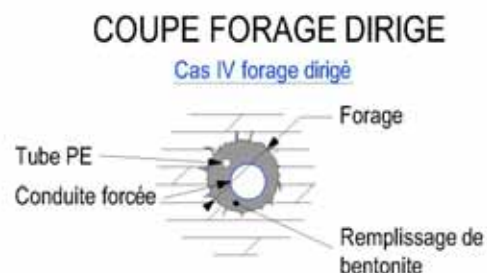


Figure 10. Coupe de forage dirigé (cf. Annexe 3)

Cependant après visite sur place avec une entreprise spécialisée, l'exécution d'une telle méthode semble difficile à ce stade du projet. Les problèmes principaux sont les accès de part et d'autre du forage, et pour amener les conduites. Cette variante pourrait être revue et affinée lors du projet définitif.

#### *Cas V: Passage des chutes en apparent*

A ce stade de l'étude, le seul moyen de passer les chutes est de poser une conduite sur le sol ou contre la falaise.

Les passages pourraient se faire avec une conduite en acier tamponnée dans le rocher (comme actuellement à la chute de la route cantonale).

Cependant afin de la cacher, un mur appareillé avec des pierres du même genre que les murs de vigne serait monté devant la conduite. L'aspect des murs ou de la falaise serait ainsi conservé.

A ce stade de l'étude le tracé définitif ainsi que la méthode de construction sont difficiles à définir. Des relevés plus précis ainsi que la possibilité éventuelle de mettre en place la conduite chez des privés, et non dans le lit de la rivière permettraient de faire un projet définitif.

#### *Trois tracés de conduite*

Face à la topographie du site, trois tracés de conduite entre la nouvelle prise d'eau et le local de turbinage ont été analysés parmi les différentes possibilités de pose de la conduite décrites aux paragraphes précédents:

- tracé 1: en privilégiant l'enfouissement de la conduite dans le lit de la rivière, soit le cas I,
- tracé 2: en privilégiant la pose de la conduite sur socle, soit le cas II,
- tracé 3: en privilégiant l'enfouissement de la conduite dans les berges, soit le cas III.

Se reporter au plan de situation (Annexe 1) pour le repérage des tronçons de conduite entre la prise d'eau et le local de turbinage. Il est à noter que le tracé définitif de certains tronçons devra être affiné lors du projet d'exécution.



Tronçons de conduite depuis la prise d'eau jusqu'au local de turbinage	Longueur	Tracé 1		Tracé 2		Tracé 3	
	m	cas	description	cas	description	cas	description
Tronçon village	56	II	sur socles	II	sur socles	II	sur socles
Chute du chemin du Moulin	80	V	hors sol	V	hors sol	V	hors sol
Tronçon en forêt	300	I	dans le lit	II	sur socles	III	berges
Chute Le Monaud	150	V	hors sol	V	hors sol	V	enterrée
Tronçon vignes	100	I	dans le lit	II	sur socles	III	berges
Tronçon route	200	I	dans le lit	II	sur socles	III	route
Tronçon Rivaz	100	I	dans le lit	II	sur socles	II	sur socles
Chute route cantonale	80	V	contre rocher	V	contre rocher	V	contre rocher
Tronçon sous la route cantonale	30	II	sur socles	II	sur socles	II	sur socles

Tableau 19. Description des 3 tracés de conduite analysés (cf. Annexe 1)

L'étude économique démontre que le tracé 3 est le plus intéressant financièrement et esthétiquement. En effet, il correspond à un maximum d'enfouissement de la conduite dans les berges, c'est-à-dire dans des terrains privés, ce qui en facilite la pose, mais implique des démarches supplémentaires dont le coût n'est pas inclus dans les devis.

Il est à noter que le tracé retenu ne comporte pas d'enfouissement de la conduite dans le lit de la rivière (cas I).

### Local de turbinage

Le local existant sera entièrement démoli. Un nouveau bâtiment sera construit au niveau de l'existant, dont l'emplacement précis reste à définir.

Se reporter au plan de l'Annexe 3.



Photo 8. Local de turbinage à démolir (cf. Annexe 3)

### Canal de fuite

La sortie de la turbine pourra être réalisée avec un canal en béton (à section rectangulaire) pour avoir un écoulement à l'air libre. Le rejet de cette canalisation se fera avant le passage sous les voies CFF. Ce passage est suffisamment important pour évacuer l'ensemble des eaux turbinées sans mettre en charge la conduite de rejet.





Photo 9. Canal de fuite sous les voies CFF

### Prise d'eau et conduite forcée existantes

La conduite forcée existante en fonte, apparente et posée sur des socles, sera démontée tout comme la prise d'eau.

La centrale existante sera maintenue en service le plus longtemps possible.



Photo 10. Prise d'eau à démonter



Photo 11. Conduite à démonter

### Conclusions, remarques et suggestions

- La variante retenue correspond à une utilisation optimale de la ressource en eau, avec un débit d'équipement de 500 l/s. Elle implique la pose d'une conduite de 1'096 m en DN 500, dont une partie sera enterrée dans les berges de manière à respecter l'esthétique du site. D'une puissance électrique maximale de 707 kW, le turbogroupe produira en moyenne 2'526'000 kWh/an, selon un prix de revient de 10.9 cts/kWh.
- L'investissement correspondant à la variante retenue a été estimé à environ 4'230'000 CHF  $\pm$  20 %. Il est à noter que ce coût prend en compte une taxe de puissance de plus de 200'000 CHF, ce qui est discutable, l'installation étant un producteur et non un consommateur.
- Cette étude s'est voulue essentiellement technique et économique. Ainsi, d'autres variantes pour l'implantation de la turbine et le débit d'équipement pourraient être rendues nécessaires pour des raisons environnementales et esthétiques. Seule la consultation préliminaire des services concernés permettra de déterminer avec précision la solution à mettre à l'enquête.
- Au niveau du génie civil, la phase suivante consiste à confirmer les chiffres annoncés ici avec un projet définitif, ou une mise en soumission, vu la topographie du site. De plus il conviendra de s'assurer de la possibilité de traverser des domaines privés.



- Des économies sur la conduite pourraient certainement être réalisées en travaillant en entreprise générale.
- Nous rappelons ici que le marché actuel des alternateurs demande un **délai d'exécution de 12 à 18 mois**.

## Annexes

Annexe 1: Plan de situation du Forestay et tracés de la nouvelle conduite (1:1000) (source: RWB, mars 2007).

Annexe 2: Profil en long du Forestay (1000/500) (source: RWB, mars 2007).

Annexe 3: Plans de la prise d'eau, du local de turbinage et coupes sur conduites (source: RWB, mars 2007).

Annexe 4: Plan du raccordement électrique de la centrale à la station transformatrice de la commune de Rivaz (source: Romande Energie, 26 février 2007).

Annexe 5: Devis des travaux de génie civil (RWB, mars 2007) comprenant:

- devis général,
- devis pour la conduite forcée:
  - sur socles,
  - enterrée sous route,
  - enterrée dans les berges,
  - enterrée dans le lit de la rivière

Annexe 6: Croquis d'encombrement de la variante retenue (source: MHyLab, février 2007).

Annexe 7: Comparaison des turbines à axe horizontal et à axe vertical.





Chute du Pont de la Rue du Carroz



Chute du chemin du Moulin



Chute du lieu-dit Le Monaud

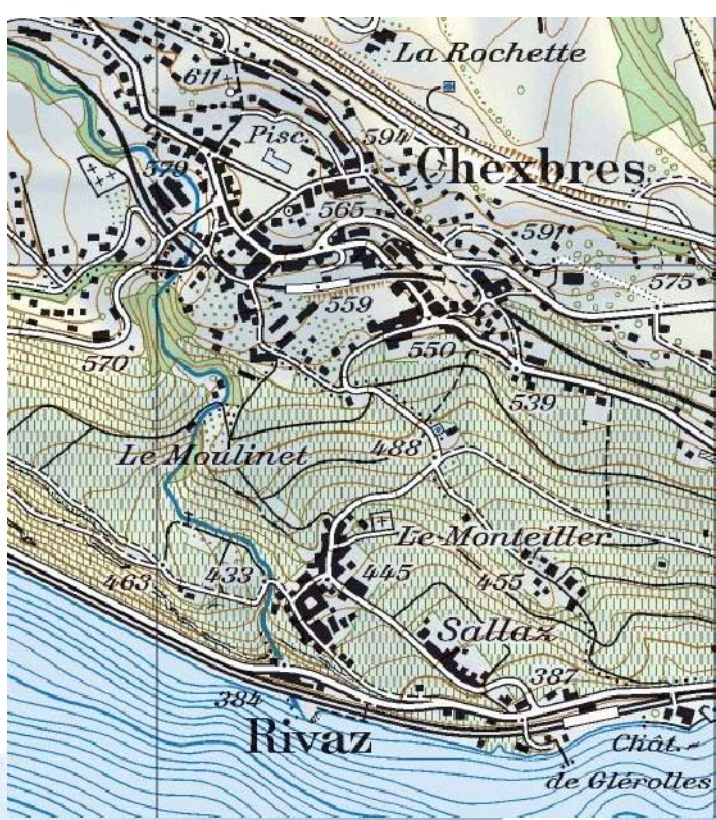


Chute de la route cantonale



## TURBINAGE DU FORESTAY

Commune de Chexbres et Rivaz



SITUATION 1:1000

### Légende :

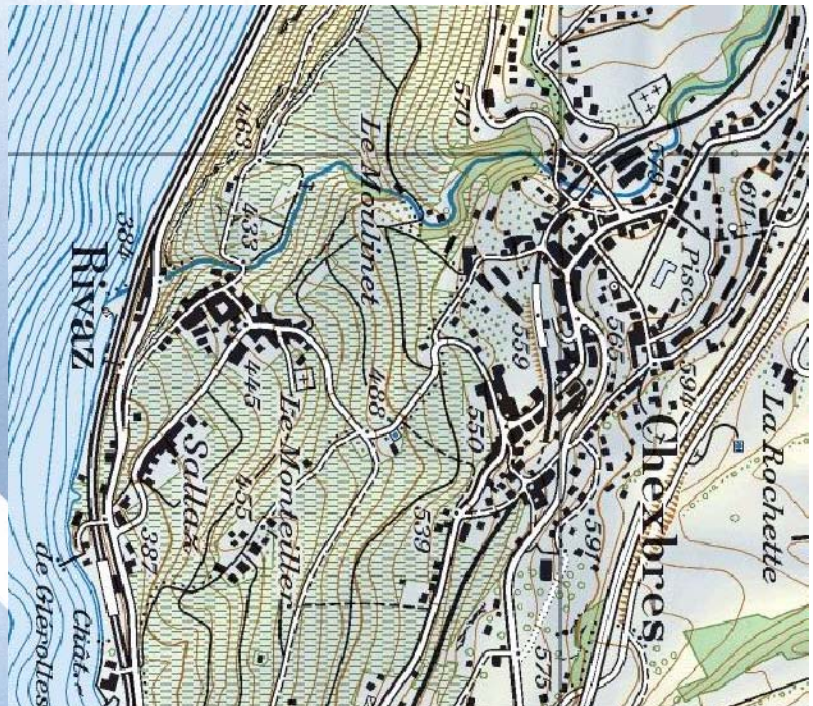
- Nouvelle conduite forcée (Cas I et II, dans le lit de la rivière)
- Nouvelle conduite forcée (Cas III, sur les berges)

Longueur développée : 1096 m

M:\06C57\07\_Plan100\_EtudesPreliminales\06C57 101-102 situation et profil en long.dwg



TURBINAGE DU FORESTAY  
Commune de Chevres et Rivaz



PROFIL EN LONG -1000 / 500

Revisé: C. GUYON 13  
Cadré: 17/04/2024

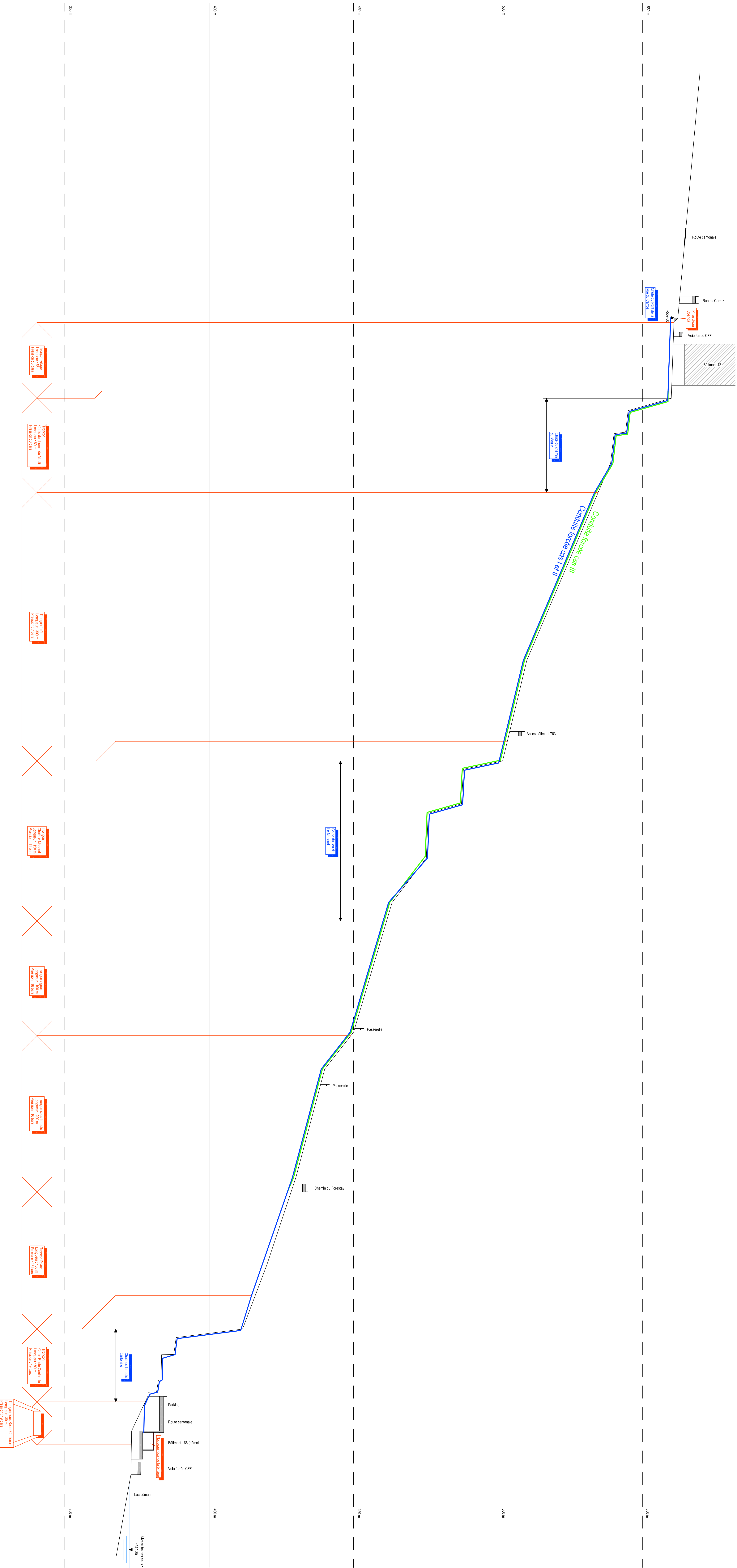
Tel. : +41 (0)24 423 79 79  
Fax. : +41 (0)24 423 79 79

email: info@mylab.ch  
web: www.mylab.ch

Projet  
N° de plan  
Date  
Version  
Dessiné par  
Approuvé par

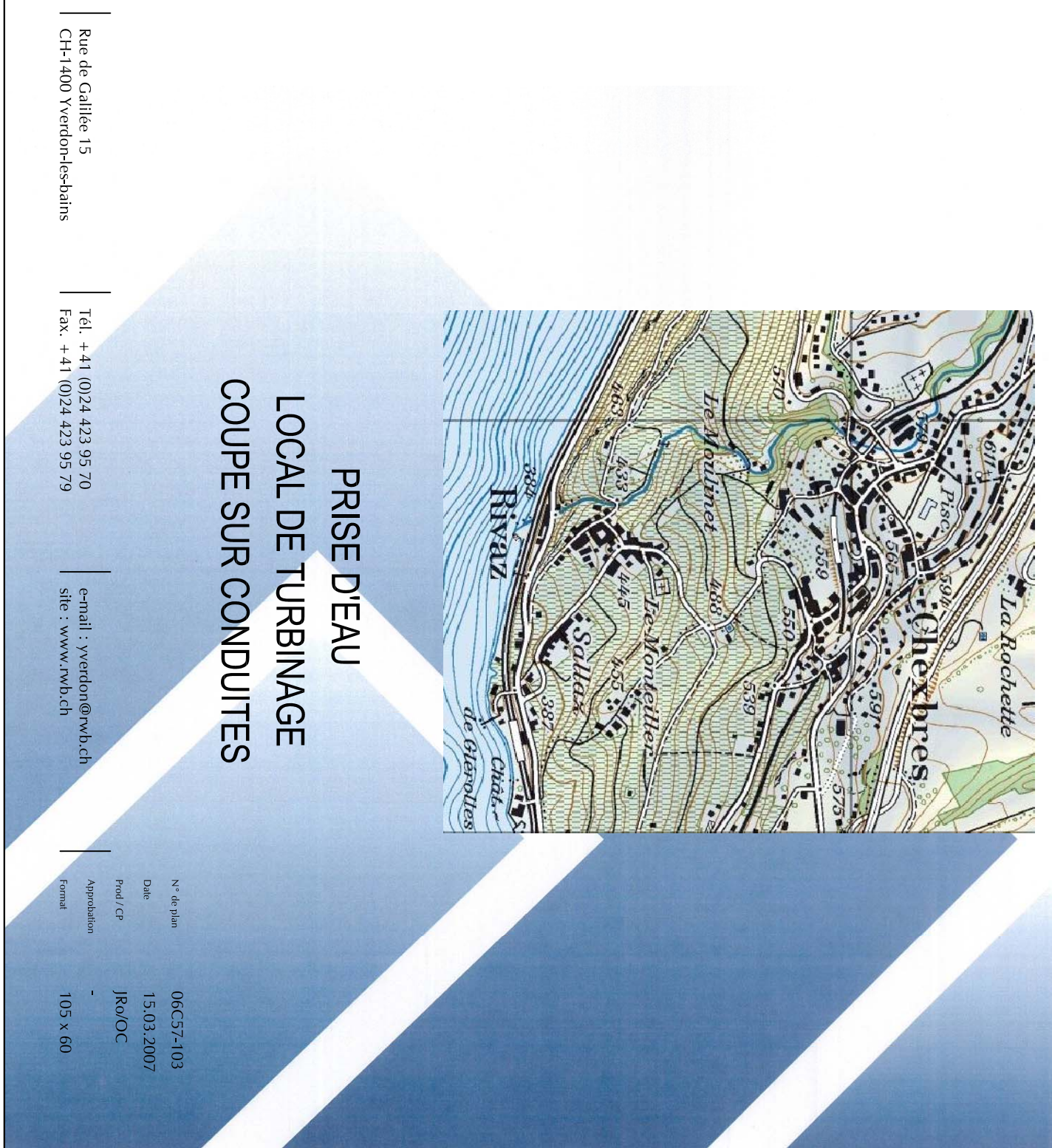
06-21-1812  
2024-03-28  
1  
100%  
C. GUYON  
C. GUYON

16/06/2024: Mise à jour: 1.000/500: Profil en long et plan

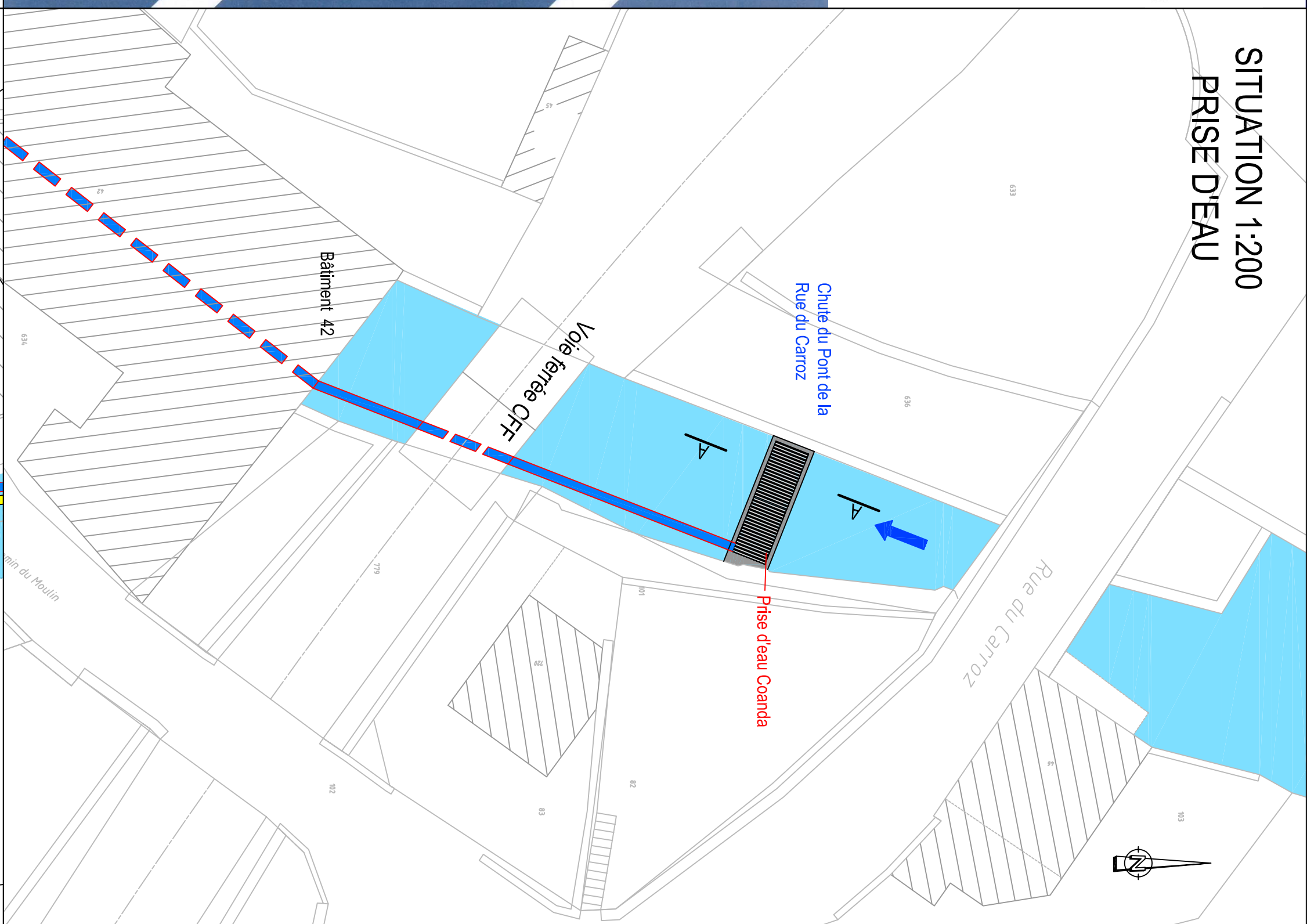




TURBINAGE DU FORESTAY  
Commune de Chevres et Rivaz

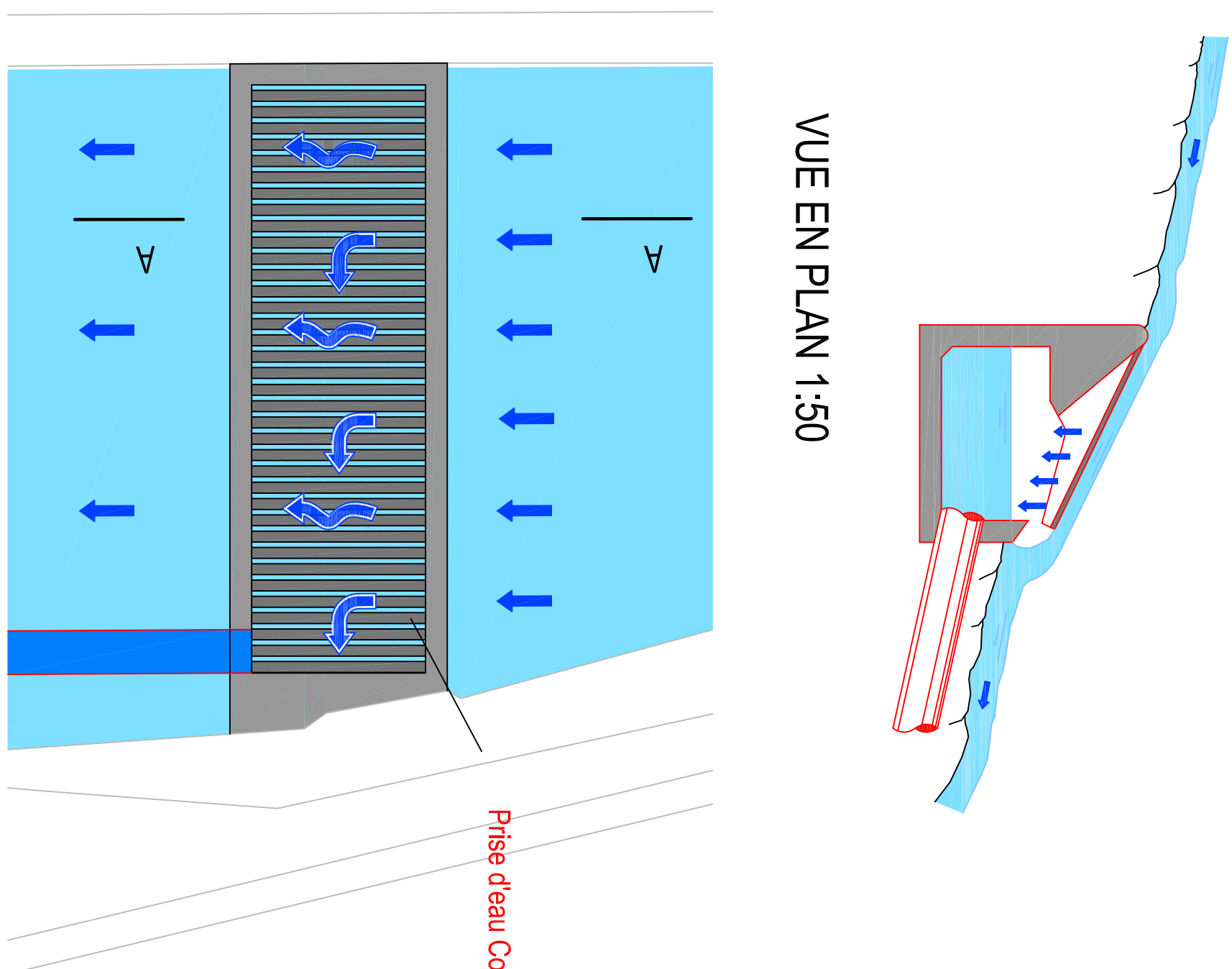


SITUATION 1:200  
PRISE D'EAU

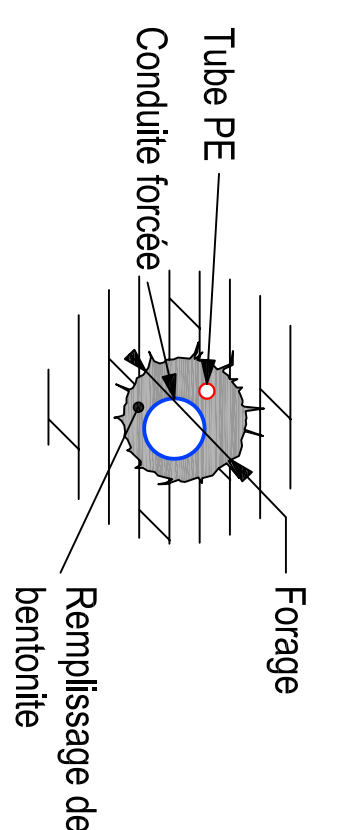


DETAIL PRISE D'EAU

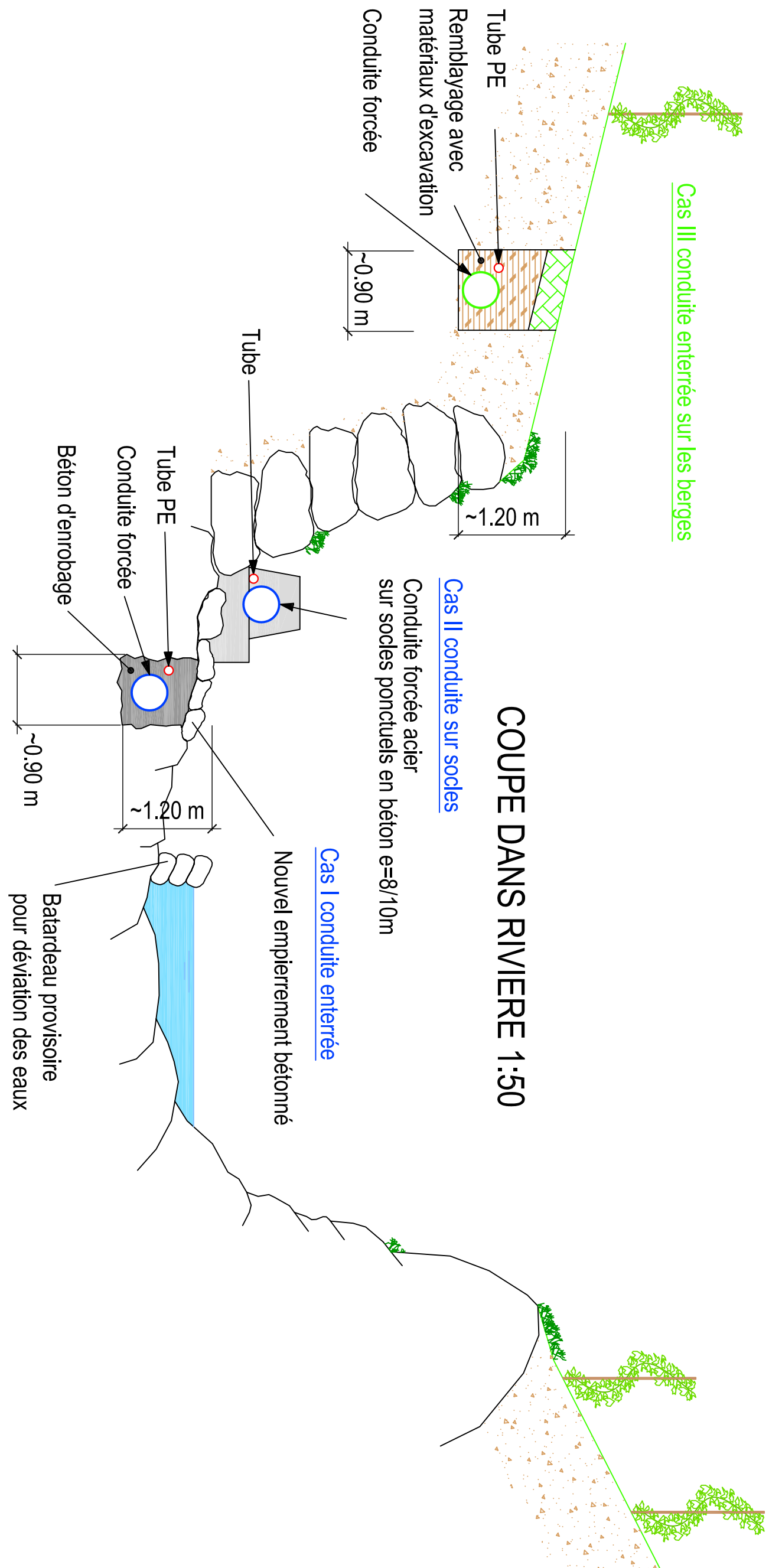
COUPE A-A 1:50



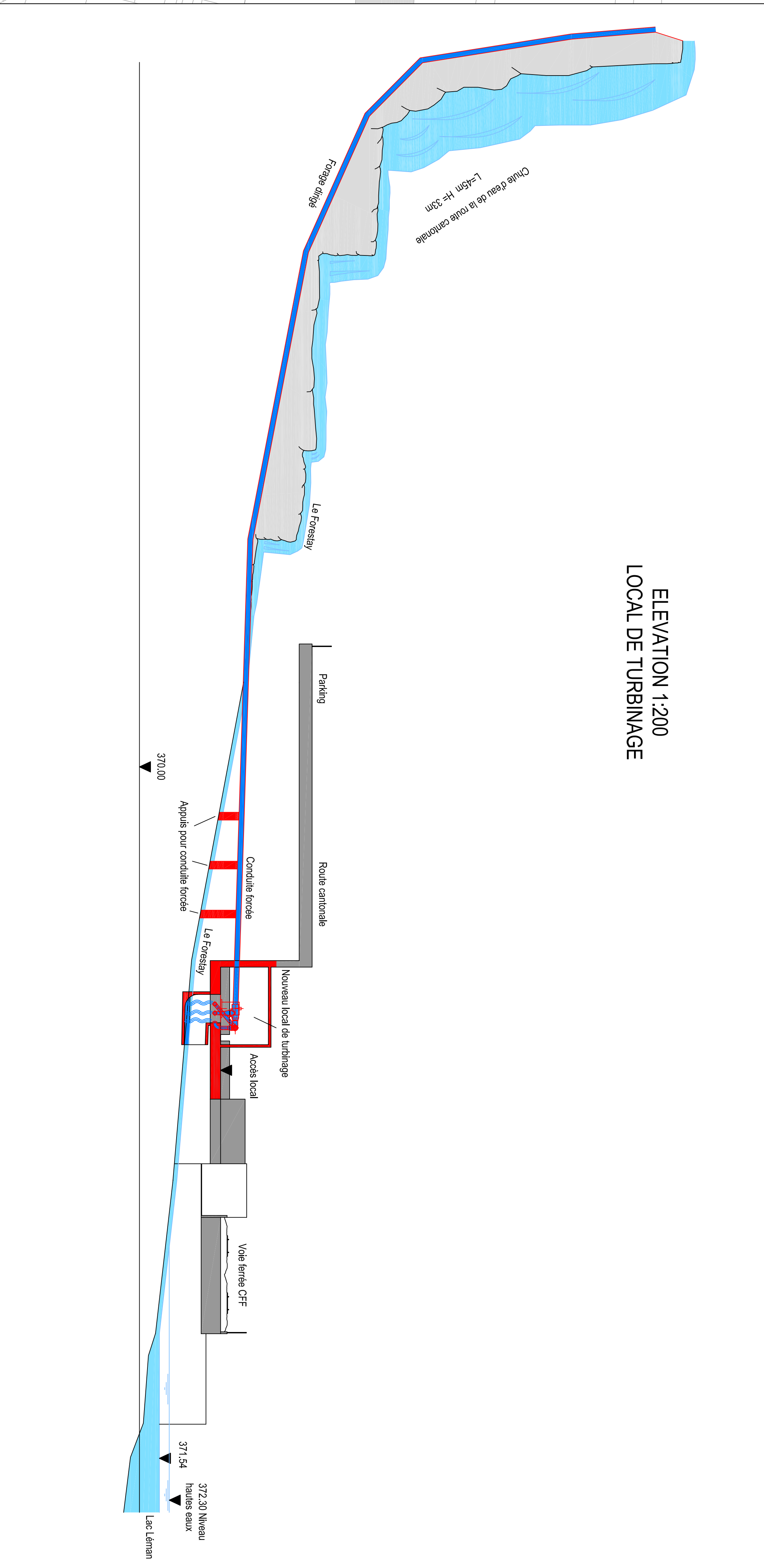
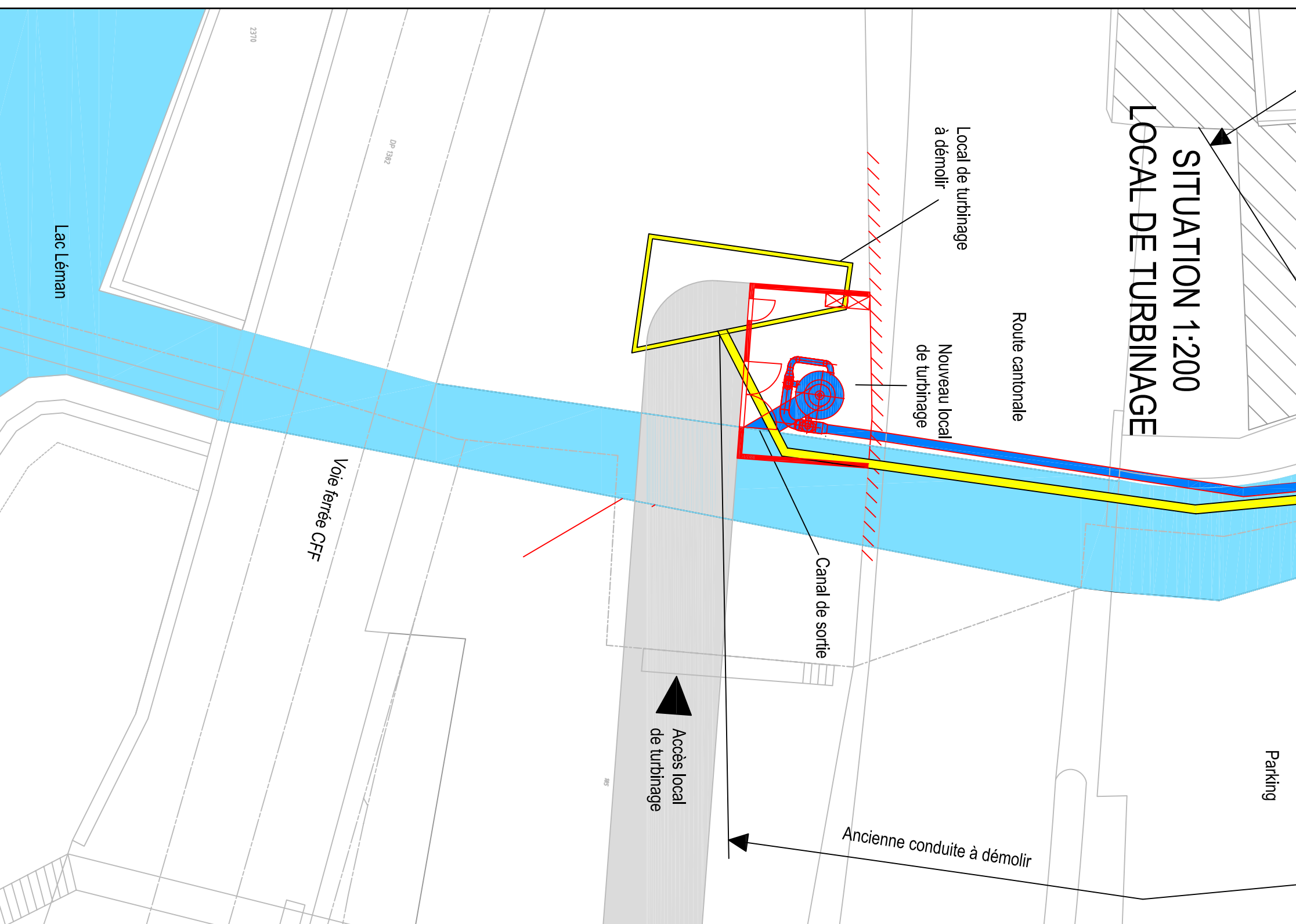
COUPE FORAGE DIRIGE 1:50



COUPE DANS RIVIERE 1:50



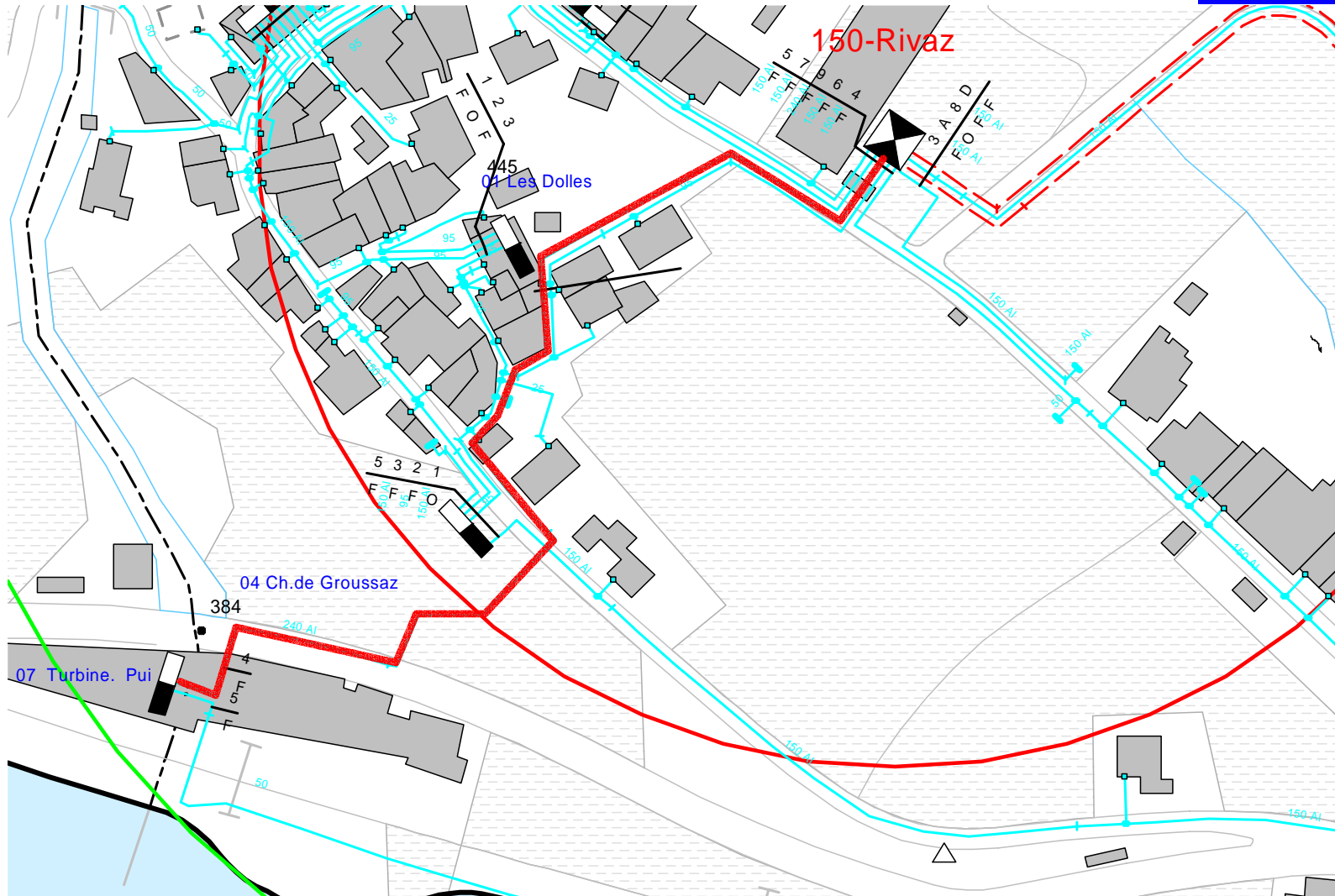
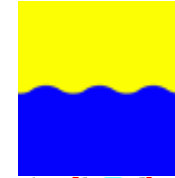
ELEVATION 1:200  
LOCAL DE TURBINAGE







# Projet: Turbine de Rivaz



COMMUNES DE CHEXBRES ET RIVAZ

PCH sur le Forestay  
Travaux de génie civil



DEVIS GENERAL DES TRAVAUX

Conduite forcée			Tracé 1			Tracé 2			Tracé 3		
Diamètre intérieur 400 mm			Conduite entièrement enterrée dans le lit de la rivière			Conduite sur socles dans le lit de la rivière			Conduite enterrée dans les berges (hors du lit de la rivière)		
Tronçon	U	Q	Cas	Prix unitaire	Total du tronçon	Cas	Prix unitaire	Total du tronçon	Cas	Prix unitaire	Total du tronçon
Prise d'eau	gl	1		17'000	17'000		17'000	17'000		17'000	17'000
Tronçon village	m	56	II sur socles	1'600	89'600	II sur socles	1'600	89'600	II sur socles	1'600	89'600
Chute du chemin du Moulin	m	80	V hors sol	4'500	360'000	V hors sol	4'500	360'000	V hors sol	4'000	320'000
Tronçon en forêt	m	300	I dans le lit	1'600	480'000	II sur socles	1'700	510'000	III berges	800	240'000
Chute Le Monaud	m	150	V hors sol	4'500	675'000	V hors sol	4'500	675'000	V enterrée	3'500	525'000
Tronçon vignes	m	100	I dans le lit	1'600	160'000	II sur socles	1'700	170'000	III berges	800	80'000
Tronçon route	m	200	I dans le lit	1'600	320'000	II sur socles	1'700	340'000	III route	1'100	220'000
Tronçon Rivaz	m	100	I dans le lit	1'600	160'000	II sur socles	1'700	170'000	II sur socles	1'700	170'000
Chute route cantonale	m	80	V contre rocher	3'500	280'000	V contre rocher	3'500	280'000	V contre rocher	3'500	280'000
Tronçon sous la route cantonale	m	30	II sur socles	1'600	48'000	II sur socles	1'600	48'000	II sur socles	1'600	48'000
Centrale de turbinage 8x6x4 m.	m3	200		300	60'000		300	60'000		300	60'000
Démo de l'ancienne conduite et prise d'eau	m	270		150	40'500		150	40'500		150	40'500
Démolition de la centrale actuelle	gl	1		15'000	15'000		15'000	15'000		15'000	15'000
Total					2'705'100			2'775'100			2'105'100
Divers et imprévus		10.00%			270'510			277'510			210'510
Total hors taxes					2'975'610			3'052'610			2'315'610

Honoraires	10.00%	297'561	305'261	231'561
------------	--------	---------	---------	---------

Longueur conduite forcée	m	1096	1096	1096
Coût de la conduite uniquement (+ 10 %)	CHF	2'829'860	2'906'860	2'169'860
Coût par mètre	CHF/m	2'582	2'652	1'980

Modification de diamètres

Moins-value pour DN 350 y c. travaux de génie civil	m	1096	100	109'600
Plus-value pour DN 500 y c. travaux de génie civil	m	1096	150	164'400

Non compris dans ce devis

- aménagement des accès à la nouvelle centrale de turbinage
- une moins-value pourrait être envisagée en réutilisant une partie des fondations existantes pour la conduite sur socle
- dans la démolition de la conduite forcée existantes, la démolition des socles n'a pas été pris en compte, ceux-ci resteront dans le lit de la rivière

# PCH Chexbres-Rivaz

## Turbinage des eaux du Forestay

### Coût des travaux en fouille par mètre courant

### Conduite forcée sur socles

CAS II	U/m	Quantité/m	PU	Coût/m
<b>COUT DU SOCLE</b>				
fouille en rocher	m3	5.00	80.00	400.00
1/2 évacuation décharge et taxes	m3	2.50	60.00	150.00
béton maigre	m2	5.00	30.00	150.00
coffrage fondation	m2	6.60	80.00	528.00
béton fondation	m3	6.30	500.00	3'150.00
coffrage socle	m2	5.30	80.00	424.00
béton socle	m3	1.60	500.00	800.00
armature	kg	900.00	3.50	3'150.00
talochage	m2	5.00	8.00	40.00
Coût du socle				8'792.00
Espacement des socles	e =	15.00		0.07

**Coût du socle par mètre** **586.13**

**PV pour exécution difficile** % 10.00 586.13 **58.61**

**Conduite forcée DN 400 acier** m 1.00 970.00 **970.00**

**Installation de chantier** % 12.00 586.13 **70.34**

**COUT BRUT / m.** **1'685.08**

### Coût des travaux en fouille par mètre courant

### Conduite forcée enterrée sous route

CAS III	U/m	Quantité/m	PU	Coût/m
coupe béton	m	2.00	15.00	30.00
démolition béton et évacuation	m3	0.10	100.00	10.00
fouille en rigole 70x120	m3	1.00	40.00	40.00
évacuation décharge et taxes	m3	1.00	80.00	80.00
PV pour rocher	m3	0.50	75.00	37.50
béton de réglage	m3	0.10	300.00	30.00
conduite DN 400 fonte	m	1.00	400.00	400.00
PE diam 100	m	1.00	15.00	15.00
béton d'enrobage 70x60	m3	0.50	320.00	160.00
remblayage grave I	m3	0.50	80.00	40.00
réglage planie	m2	1.00	6.00	6.00
béton route	m2	0.10	350.00	35.00
Total brut / m				883.50
Longueur du tronçon	m			1.00

**Total conduite 883.50**

**PV pour exécution difficile % 10.00 883.50 88.35**

**Installation de chantier % 12.00 883.50 106.02**

**COUT BRUT / m. 1'077.87**

# PCH Chexbres-Rivaz

## Turbinage des eaux du Forestay



### Coût des travaux en fouille par mètre courant

### Conduite forcée enterrée dans les berges

CAS III	U/m	Quantité/m	PU	Coût/m
défrichage éventuel	m	1.00	20.00	20.00
décapage terre végétale	m2	0.30	15.00	4.50
fouille en rigole en terrain meuble 90x100	m3	1.20	40.00	48.00
évacuation décharge et taxes	m3	0.40	80.00	32.00
PV pour rocher	m3	0.50	75.00	37.50
béton de réglage	m3	0.10	400.00	40.00
conduite DN 400 fonte revêt ext ciment	m	1.00	400.00	400.00
PE diam 100	m	1.00	20.00	20.00
sable enrobage PE 30x30 cm	m3	0.10	0.00	0.00
remblayage avec mat excavation	m3	0.80	50.00	40.00
remise en place terre végétale	m2	1.00	8.00	8.00
ensemencement	m2	1.00	3.00	3.00
Total brut / m				653.00
Longueur du tronçon	m			1.00

**Total conduite** **653.00**

**PV pour exécution difficile** % 10.00 653.00 **65.30**

**Installation de chantier** % 12.00 653.00 **78.36**

**COUT BRUT / m.** **796.66**

### Coût des travaux en fouille par mètre courant

### Conduite forcée enterrée dans le lit de la rivière

CAS I	U/m	Quantité/m	PU	Coût/m
défrichage	m	1.00	20.00	20.00
batardeau	m	1.00	50.00	50.00
fouille en rigole en rocher 90 x 120 à 150	m3	1.50	100.00	150.00
évacuation décharge et taxes	m3	1.00	80.00	80.00
conduite forcée diam 400 fonte	m	1.00	400.00	400.00
PE diam 100	m	1.00	20.00	20.00
béton enrobage	m3	1.00	500.00	500.00
enrochement 120x 30 x 2.4	to	1.00	100.00	100.00
Total brut / m				1'320.00
Longueur du tronçon	m			1.00

**Total conduite** **1'320.00**

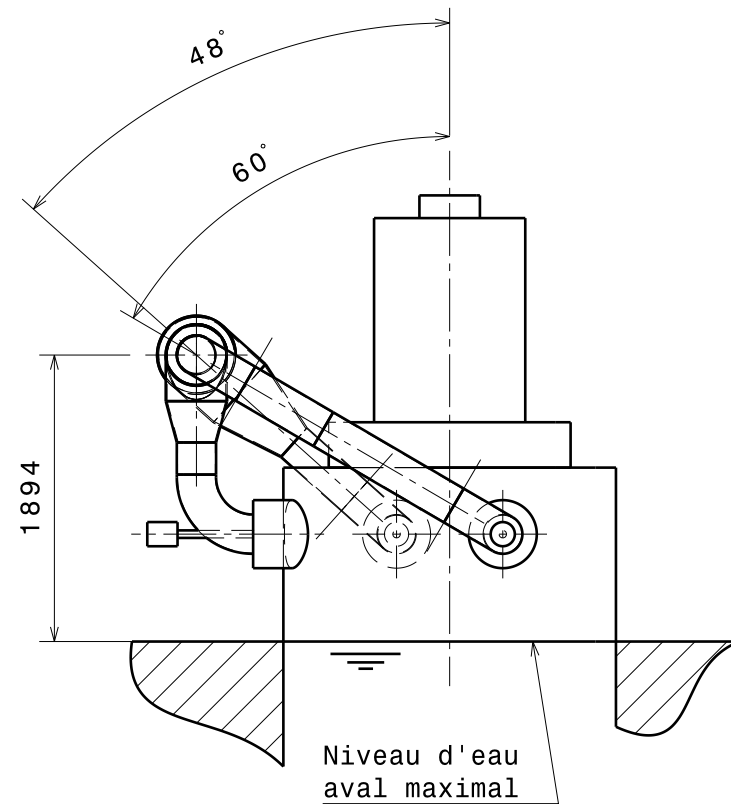
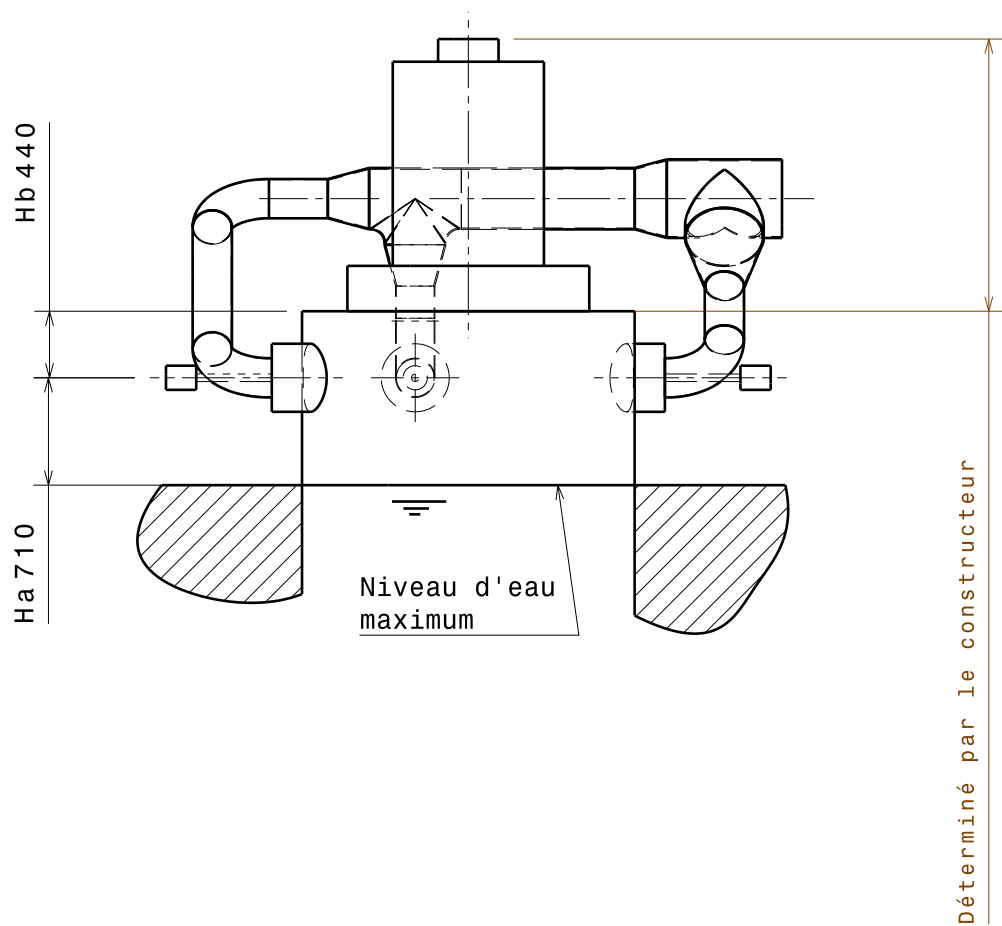
**PV pour exécution difficile**      %      10.00      1'320.00      **132.00**

**Installation de chantier**      %      12.00      1'320.00      **158.40**

**COUT BRUT / m.** **1'610.40**

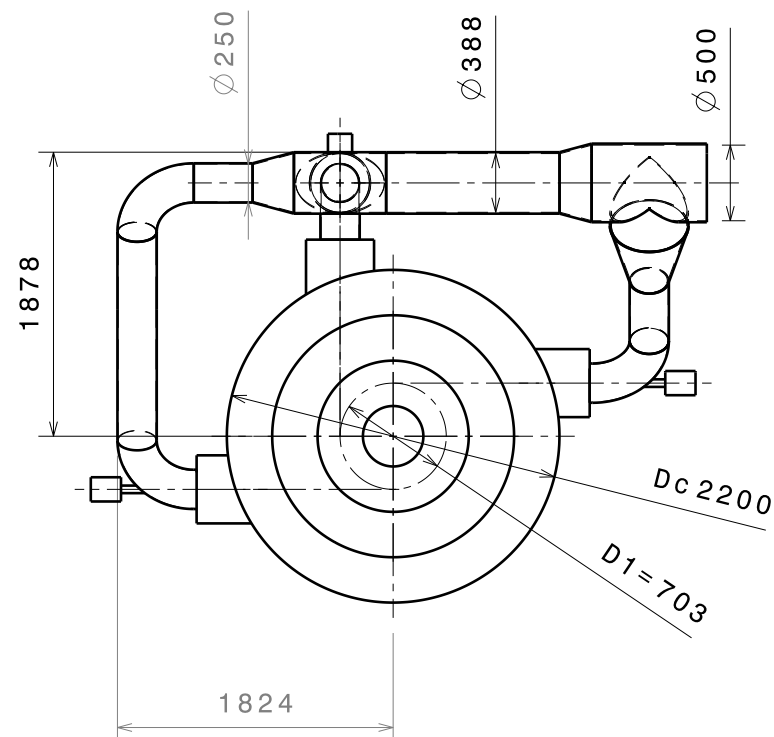
This document is the property of MHyLab and shall not be copied or disclosed to any third party without MHyLab written agreement.  
Ce document est la propriété de MHyLab et ne doit pas être copié ou transmis à un tiers sans l'accord écrit de MHyLab.

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



Echelle : 1:50

Uniquement pour information  
Dessin non valable pour exécution



F					
E					
D					
C					
B	Révision de la position des injecteurs	19.06.07	AC		
REV.	MODIFICATIONS	DATE	DESS.	CONTR.	APPR.
ENSEMBLE	POIDS	ECHELLES 1:50	DESSINE A. Choulot	21.02.07	
Ma0620 Rivaz Variante A Turbine 3 injecteurs Hn = 173 m, Qmax = 0.5 m3/s 750 t/min Croquis d'encombrement			CONTROLE		
			APPROUVE		
MHyLab Laboratoire de Mini-Hydraulique 1354 MONTCHERAND SUISSE			MP0620-0001-3		REV. B

DESSIN CDD (CATTIA-CADAY-DRAFTING)



## Comparaison entre les petites turbines Pelton à axe horizontal et axe vertical

Sujet	Axe vertical	Axe horizontal
Assemblage alternateur turbine	<p>L'alternateur repose sur le bâti de la turbine. Il n'y a pas de plaque de base et la roue est toujours en porte à faux sur l'arbre de l'alternateur.</p> <p>Tous problèmes d'alignement roue-injecteur sont évités.</p> <p>L'ensemble turbo-alternateur monté à blanc en atelier peut généralement être monté sur site tel quel.</p>	<p>L'alternateur et la turbine doivent obligatoirement reposer sur un bâti (ou une plaque de base) rigide. Il s'agit là d'un élément supplémentaire nécessitant des pièces d'assemblage supplémentaires.</p> <p>Cette conception présente des risques de désalignement au moment du bétonnage, problème hélas souvent constaté.</p> <p>Suivant la conception retenue, la turbine possède ses propres paliers, ce qui a également pour effet de compliquer l'alignement et de multiplier les pièces d'usure.</p>
Ecoulements dans le bâti	<p>L'eau s'échappant des augets s'écoule naturellement vers le bas pour le demi auget inférieur. Pour le demi auget supérieur, le renvoi circulaire et central oriente l'écoulement en périphérie du bâti de telle sorte que tout risque de rejaillissement sur la roue ou les jets peut être écarté.</p>	<p>Le risque de rejaillissement sur la roue et sur les jets est élevé, surtout sur les turbines à deux injecteurs ou le prolongement de la trajectoire des jets est convergente.</p> <p>Plusieurs centrales hydrauliques Pelton à axe horizontal démontrent malheureusement cette difficulté.</p> <p>Le phénomène de rejaillissement est très difficile à prévoir et compliqué à résoudre.</p> <p>Le renvoi d'eau est de géométrie compliquée.</p> <p>Ceci est d'autant plus vrai pour les petites turbines où l'on est appelé à simplifier les formes de bâti.</p>
Effort radial sur la roue	<p>Pour les turbines à nombre de jets pair, l'effort sur la roue est annulé lorsque les injecteurs en fonction se font face. C'est le cas pour une turbine à deux injecteurs.</p>	<p>L'effort radial sur la roue n'est jamais nul. Dans le cas d'un fonctionnement à deux injecteurs, les deux composantes s'additionnent géométriquement.</p>
Joint d'arbre	<p>Le joint d'arbre est très simplifié (anneau centrifuge).</p>	<p>Le joint d'arbre nécessite d'avoir une chambre avec décharge.</p>
Etanchéité du bâti	<p>Nombre de joints limité.</p>	<p>Nombre de joints élevé (calotte, coupe du bâti par l'axe)</p>

Porte à faux de la roue	De manière générale, le porte à faux est réduit.	De manière générale, le porte à faux (dans les solutions sans paliers turbine) est important.
Visite périodique de l'état de la machine	L'inspection périodique de la roue, des injecteurs et des déflecteurs peut s'effectuer en un seul coup d'œil, aucun élément n'en cachant un autre. (visite par-dessous)	L'inspection périodique de la roue, des injecteurs et des déflecteurs nécessite un démontage du capot pour accéder à l'injecteur supérieur et une visite par-dessous pour accéder à l'injecteur inférieur, la roue les cachant à tour de rôle suivant le point de vue.
Pertes par ventilation de la roue	Turbine à un injecteur : pertes plus élevées que dans une variante à axe horizontal. Turbine à deux injecteurs : Pertes comparables.	Turbine à un injecteur : pertes moins élevées que dans une variante à axe vertical. Turbine à deux injecteurs : Pertes comparables.
Déflexion	Aucune sollicitation mécanique due à l'interaction entre les jets en cas de déflexion.	Sollicitations mécaniques importantes dues à l'action du jet supérieur sur l'injecteur inférieur en cas de déflexion.