

Rapport final du 7 avril 2006

Projet de réhabilitation d'une centrale hydro-électrique au moulin de Noiraigue

Etude de faisabilité

Projet no. 101'267 Contrat no. 151'495



Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN, 3003 Berne

Mandataire:

MHyLab, En Platé, 1354 Montcherand

RWB SA, Epervier 4, 2053 Cernier

Auteurs:

Aline Choulot (MHyLab)

Raymond Chenal (MHyLab)

Vincent Denis (MHyLab)

Olivier Chuat (RWB)

Groupe de suivi:

Bruno Guggisberg, Office fédéral de l'énergie OFEN

Manuel Buser, Programme PCH

Michael Zaech, Propriétaire

Cette étude à été élaborée dans le cadre du programme de recherche petites centrales hydrauliques de l'Office fédéral de l'énergie OFEN.

Les mandataires de l'étude sont seuls responsable de son contenu.

Résumé

Le Moulin de Noiraigue a été construit au XVI^{ème} siècle sur la rive gauche de la Noiraigue à quelques mètres de sa source. Il a été utilisé jusqu'en 1976, date à laquelle le dernier meunier de Noiraigue céda la turbine à un musée.

Actuellement, le site présente les composantes suivantes:

- un barrage, construit en 1860
- un canal d'amenée
- une vanne d'entrée manuelle
- une petite turbine à flux traversant, de quelques kW, installée à la place de l'ancienne turbine,
- un canal de fuite,
- une roue à eau de démonstration, à l'arrêt, appartenant à la commune,
- une prise d'eau pour alimenter les fontaines de la commune de Noiraigue.

Deux variantes sont étudiées pour la réhabilitation du site.

La variante A, correspond à un minimum de génie civil. Ainsi, la configuration du site est conservée, c'est-à-dire que le barrage et la chambre de captage, le canal amont, le local de turbinage et le canal aval seront rénovés ou reconstruits suivant leur vétusté. En d'autres termes, l'emprise du projet reste identique à celle actuelle.

La variante B correspond à une utilisation optimale de la ressource en eau, et implique des adaptations plus importantes du site.

Suite à l'analyse économique préliminaire des deux variantes, le choix s'est porté sur la solution A, laquelle a été optimisée d'un point de vue technique et économique.

L'étude financière conclut à la faisabilité de l'installation, le prix de revient du kWh étant estimé à 13 cts.

Table des matières

Résumé	3
1 Introduction	6
2 Situation actuelle et envisagée	6
2.1 Historique et situation actuelle	6
2.2 Situation envisagée: deux variantes	6
3 Hydrologie et détermination de la courbe des débits classés de la source de la Noiraigue	7
3.1 Données à disposition	7
3.2 Hydrologie	8
3.3 Etablissement de la courbe des débits classés	8
3.4 Débits classés et choix des variantes pour le débit d'équipement	10
4 Etude comparative des variantes A et B	10
4.1 Etude technique comparative des variantes A et B	10
4.1.1 Débit d'équipement	10
4.1.2 Dénivellation	11
4.1.3 Type de turbine	11
4.1.4 Critères de choix pour le dimensionnement	11
4.1.5 Nombre de turbines	12
4.1.6 Vitesse de rotation	12
4.1.7 Performances des turbogroupes	13
4.1.8 Principaux aménagements	18
4.1.9 Résumé des principales caractéristiques techniques des variantes A et B	19
4.2 Etude économique comparative des variantes A et B	20
5 Analyse technique détaillée de la variante A	22
5.1 Rappel des caractéristiques de base de la variante A	22
5.2 Equipement hydromécanique	22
5.2.1 Turbine	22
5.2.2 Multiplicateur de vitesse	23
5.2.3 Vannes	23
5.2.4 Grille	23
5.2.5 Mise en place, montage et démontage du turbogroupe	24
5.3 Equipement électrique	25
5.3.1 Génératrice	25
5.3.2 Contrôle commande	25
5.3.3 Dispositif de sécurité	26
5.3.4 Raccordement électrique	26
5.4 Génie civil	27
5.4.1 Bassin de captage	27
5.4.2 Canal supérieur	28
5.4.3 Local de turbinage	30
5.4.4 Canal inférieur	30
5.4.5 Vannes batardeaux	31

6	Analyse économique détaillée de la variante A	32
6.1	Investissements	32
6.1.1	Electromécanique et appareillage	32
6.1.2	Génie civil	33
6.2	Frais d'exploitation	34
6.3	Chiffre d'affaire, bénéfice annuel et prix de revient	34
6.4	Analyse de sensibilité	36
7	Etude du raccourcissement du tube d'aspiration de la variante A	37
8	Conclusions, remarques et suggestions	39
9	Suite des travaux	39
10	Annexes	40

1 Introduction

Dans le cadre du plan annuel 2005 du programme petites centrales hydrauliques de SuisseEnergie, le laboratoire MHyLab et le bureau de génie civil RWB ont été mandatés par M. Zaech, propriétaire de la concession, pour effectuer une étude de faisabilité technico-économique pour la réhabilitation du Moulin de Noiraigue.

2 Situation actuelle et envisagée

2.1 Historique et situation actuelle

Le Moulin de Noiraigue a été construit au XVI^{ème} siècle sur la rive gauche de la Noiraigue à quelques mètres de sa source. Il a été utilisé jusqu'en 1976, date à laquelle le dernier meunier de Noiraigue céda la turbine à un musée.

Actuellement, le site présente les composantes suivantes:

- un barrage, construit en 1860
- un canal d'amenée
- une vanne d'entrée manuelle
- une petite turbine à flux traversant, de quelques kW, installée à la place de l'ancienne turbine,
- un canal de fuite,
- une roue à eau de démonstration, à l'arrêt, appartenant à la commune,
- une prise d'eau pour alimenter les fontaines de la commune de Noiraigue.

2.2 Situation envisagée: deux variantes

Deux variantes sont étudiées pour la réhabilitation du site.

La variante A, correspond à un minimum de génie civil. Ainsi, la configuration du site est conservée, c'est-à-dire que le barrage et la chambre de captage, le canal amont, le local de turbinage et le canal aval seront rénovés ou reconstruits suivant leur vétusté. En d'autres termes, l'emprise du projet reste identique à celle actuelle.

La variante B correspond à une utilisation optimale de la ressource en eau, et implique des adaptations plus importantes du site.

Ces modifications de l'infrastructure seront développées plus en détails dans les paragraphes 4.1.8 et 5.4.

3 Hydrologie et détermination de la courbe des débits classés de la source de la Noiraigue

3.1 Données à disposition

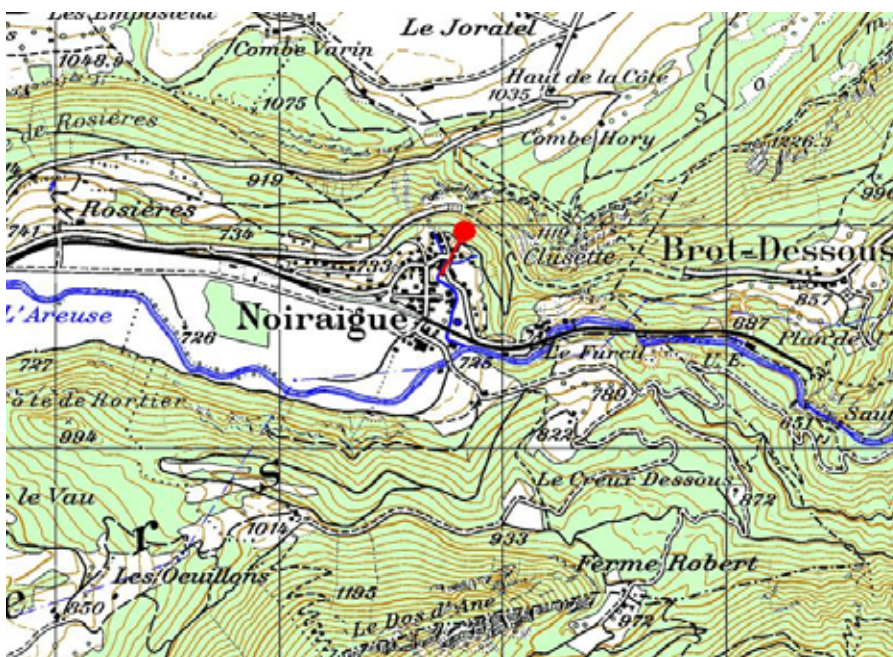


Figure 1. Carte du site avec les cours d'eau de la Noiraigue et de l'Areuse, avec la position de la station de mesure de la Noiraigue en bout de flèche rouge

Entre 1959 et 1979, la Noiraigue faisait partie des stations répertoriées dans l'Annuaire hydrographique suisse. Les mesures ont été réalisées 100 à 150 m en aval du site du Moulin de Noiraigue (cote 545 720/200780). A ce point de mesure convergent plusieurs cours d'eau:

- la source de la Noiraigue,
- l'Epinette, qui rejoint la Noiraigue à la fin du canal de fuite du Moulin, dont le débit maximal est estimé à 100 l/s,
- la Libarde, qui rejoint la Noiraigue plus en aval, dont le débit maximal est estimé à 100 l/s.

Il est à noter que l'Epinette et la Libarde n'ont pratiquement aucun débit lors des basses eaux et des eaux moyennes, tout au plus un débit bien visible lors des hautes eaux, quand la Noiraigue débite de 3 à 7 m³/s à la source.

La Noiraigue se jette dans l'Areuse, dont les débits sont relevés depuis 1959, et sans interruption jusqu'aux dernières données disponibles de 2003, au niveau de la station

Areuse St Sulpice. Ces données permettent d'effectuer une corrélation sur la période 1959 – 1979 et une extrapolation sur les données 1980 – 2003.

3.2 Hydrologie

La source de la Noiraigue (qui signifie "eau noire") est alimentée par les eaux des marais du plateau de la Brévine, tout comme l'Areuse

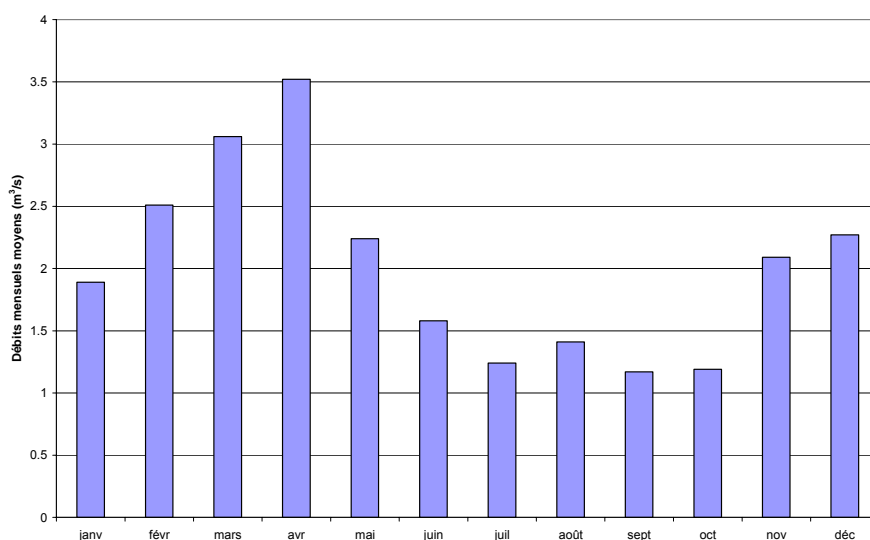


Figure 2. Evolution des débits mensuels, Noiraigue, station de mesures, moyennes sur la période 1959-1979

La Figure 2 montre l'évolution des débits mensuels au cours de l'année, avec:

- une saison de basses eaux en été,
- une saison de hautes eaux de la fin de l'hiver au printemps.

3.3 Etablissement de la courbe des débits classés

Afin d'obtenir la courbe des débits classés pour la source de la Noiraigue à partir des données à disposition, la démarche est la suivante:

1. Calage des débits de l'Areuse (station St-Sulpice) de la période 1959-1979 par rapport à celle de 1980-2003 (source: Annuaire Hydrologique Suisse), et établissement d'une corrélation entre ces deux périodes,
2. Calage des débits de la Noiraigue de la période 1959-1979 par rapport à celle de 1980-2003, grâce à la corrélation précédente,
3. Retrait de 200 l/s pour prendre en compte l'apport des deux cours d'eau entre la source et l'ancienne station de mesure pour les débits supérieurs à 3m³/s, c'est-à-dire uniquement en période de hautes eaux,

Il est à noter que la prise d'eau se trouve au niveau de la source et que le site n'est pas soumis à la loi sur les débits résiduels. Il est entendu que pour des raisons de beauté du site, toute l'eau de la source ne pourra pas être prélevée. De plus, le muret du canal d'amenée servira de déversoir ce qui garantira un débit dans le lit naturel de la Source notamment en période de hautes eaux.

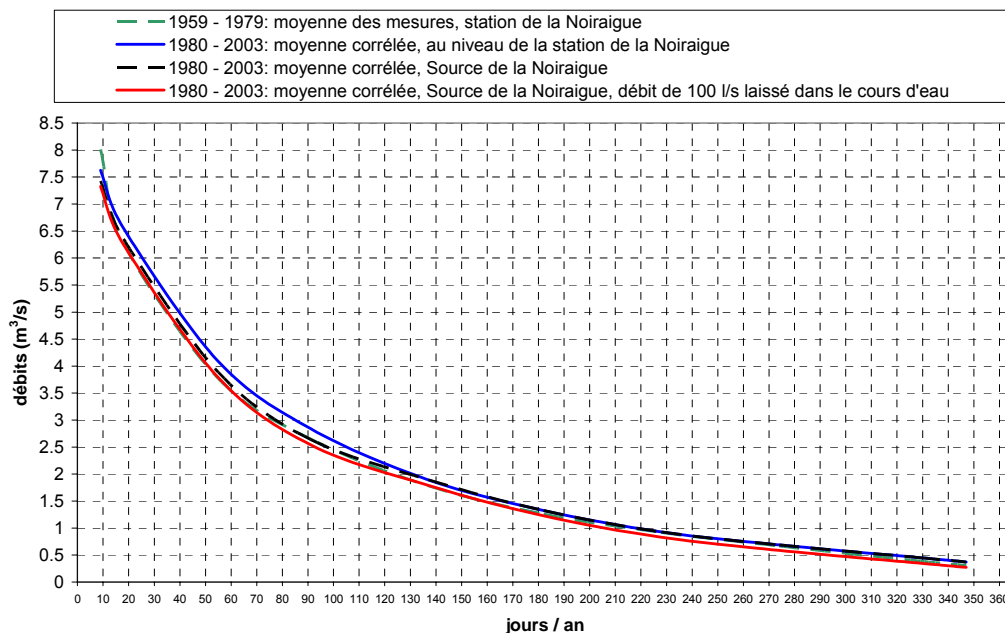


Figure 3. Courbe des débits classés de la Noiraigue pour les périodes 1959 – 1979 et 1980 -2003, au niveau de la station de mesure et à la source de la Noiraigue

Ainsi, l'étude utilise la courbe des débits classés moyennés sur la période 1980-2003 au niveau de la source de la Noiraigue, comme présenté dans les figures 3 et 4.

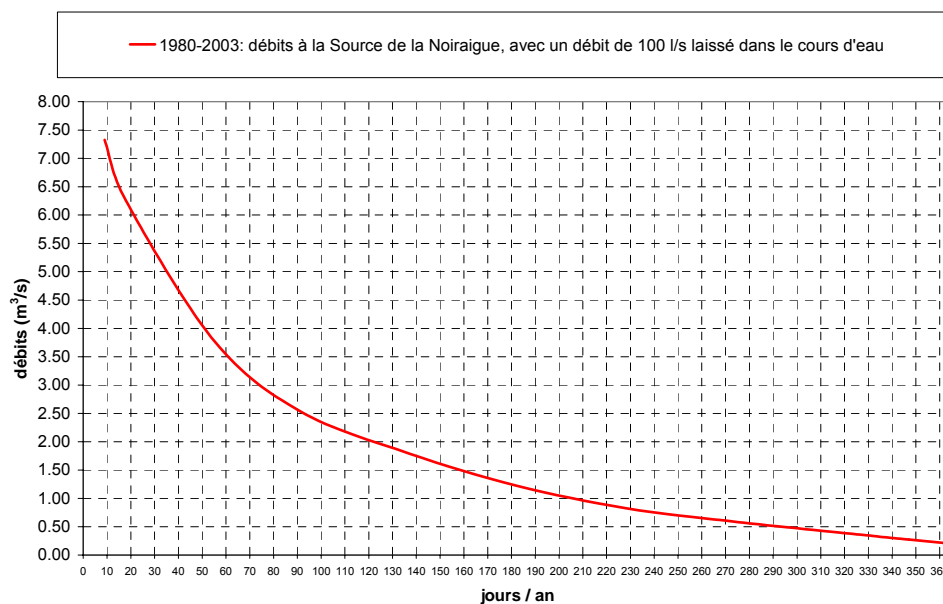


Figure 4. Courbe des débits classés turbinables à la source de la Noiraigue pour la période 1980 – 2003

3.4 Débits classés et choix des variantes pour le débit d'équipement

La variante A étant fonction du génie civil, le débit d'équipement n'est pas uniquement déterminé par la courbe des débits classés et sera précisé dans la suite de l'étude.

Par contre, la variante B vise à utiliser de façon optimale la ressource en eau et part de l'analyse de la courbe des débits classés. Celle-ci préconise le débit atteint ou dépassé à 60 jours, soit 3.5 m³/s.

4 Etude comparative des variantes A et B

Comme présenté aux paragraphes 2.2 et 3.4, deux variantes sont étudiées :

- la variante A correspond à un minimum de génie civil,
- la variante B correspond à une utilisation optimale de la ressource en eau.

4.1 Etude technique comparative des variantes A et B

4.1.1 Débit d'équipement

Le débit d'équipement de la variante B est déterminé à partir de la courbe des débits classés soit à 3.5 m³/s. La démarche consiste alors à dimensionner les équipements et le génie civil pour ce débit.

La variante A suit la démarche inverse: le débit d'équipement est choisi de façon à limiter les coûts de génie civil, tout en optimisant la production.

Dans les deux cas de figure, le débit d'équipement doit respecter les contraintes imposées par le turbogroupe alimenté par un canal à écoulement libre. En effet, le bon fonctionnement de la turbine impose une bonne distribution des vitesses dans le canal d'amenée, un écoulement de qualité, ainsi qu'une accélération du flux dans la turbine.

Par ailleurs, le débit d'équipement influe directement sur la taille de la turbine, et le génie civil; de plus, il est indispensable de maintenir l'aspirateur immergé, ce qui induit des travaux d'excavation plus ou moins importants sous la turbine et au niveau du canal de fuite.

Ainsi, pour la variante A, la détermination du débit d'équipement prend en compte:

- la section du canal d'amenée avec un rehaussement du muret de 70 cm, soit: 1.65 m x 1.20 m,
- la vitesse d'approche de l'eau, qui est de 1.2 m/s.

Il en résulte un débit d'équipement de 2.2 m³/s, atteint ou dépassé 108 jours/an (selon la courbe des débits classés).

4.1.2 Dénivellation

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

Le niveau d'eau amont correspond à la hauteur du muret du canal d'amenée, puisque celui-ci sert de déversoir. Le haut du muret est actuellement à une altitude de 736.70m au niveau du by-pass. La concession ne mentionnant pas de contrainte en terme de dénivellation, et vu la configuration du site et l'avis du propriétaire, il est prévu de rehausser le niveau de 70 cm.

Ainsi, le niveau du plan d'eau amont est à une altitude de 737.40 m pour les variantes A et B.

Le niveau d'eau aval dépend du débit sortant de la turbine, du canal de fuite, mais aussi du cours d'eau naturel, surtout en période de crue. Les niveaux d'eau aval ont été calculés en considérant les largeurs de canal de fuite suivantes:

- 250 cm pour la variante A,
- 265 cm, pour la variante B,

Soit, dans les deux cas, un élargissement du canal de fuite, actuellement de 150 cm, ceci sur 10 ml.

Ainsi, malgré un débit d'équipement plus grand, le niveau d'eau aval de la variante B est plus bas que celui de la variante A car le canal de fuite est plus large.

4.1.3 Type de turbine

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

Pour des raisons de coût, d'investissement et d'exploitation, les turbines à double réglage ne sont pas proposées, la turbine à simple réglage développée par MHyLab (réglage des pales de la roue, mais distributeur fixe) présentant déjà une très bonne flexibilité face aux variations de débits.

4.1.4 Critères de choix pour le dimensionnement

Le dimensionnement de la turbine pour chaque variante est une optimisation qui prend en compte les critères suivants:

- la distribution du rendement en fonction du débit d'équipement, et notamment le débit qui correspond au rendement maximal, en vue de maximiser la production électrique annuelle
- la taille de la turbine:
 - son diamètre de roue, qui doit être minimal afin de limiter les coûts,
 - son encombrement hors tout, lié également au diamètre de roue, afin de limiter l'excavation pour son intégration au site;
- la vitesse de rotation, que l'on cherchera maximale afin de limiter la taille du groupe turboélectrique

- le comportement en cavitation, qui, pour les turbines à 4 pales MHyLab avec une telle chute, ne pose pas de contraintes majeures (la hauteur d'aspiration maximale est supérieure à 5 m dans les deux cas, soit supérieure également à la dénivellation).

4.1.5 Nombre de turbines

Dans la variante B, le choix de deux turbines est motivé par la taille de la machine. En effet, ici, une machine avec un débit d'équipement de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ a un diamètre de roue supérieur à 1 m, et une hauteur totale qui entraînerait des excavations non réalistes vu la configuration du site.

Afin de limiter les coûts du turbogroupe pour cette variante B, les deux turbines sont identiques (bénéficiant de l'effet copie), à la seule différence qu'une seule sera équipée d'une commande de réglage des pales. Ainsi, la deuxième turbine fonctionnera à débit fixe, ce débit correspondant au point de rendement maximal atteint avec la turbine réglable.

Avec l'objectif de trouver un optimum entre la taille de ces deux machines et l'évolution des rendements en fonction des débits, il est choisi de fixer le rendement maximal à $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ainsi, avec un rendement de turbine maximal de 89.8 % (sans les pertes palier), le débit de la turbine fixe est de $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis que le débit maximal de la turbine réglable est de $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour la variante A, le choix de deux turbines n'est pas nécessaire vu la taille raisonnable de la machine. De même, afin de trouver un optimum entre la taille de cette machine et l'évolution des rendements en fonction des débits, il est choisi de fixer le rendement maximal à un débit de $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un débit d'équipement de $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il est à noter que la turbine réglable de la variante A est proche de celle de la variante B, l'une étant dimensionnée pour un débit de $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$, l'autre pour $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.1.6 Vitesse de rotation

Conformément à l'avis de plusieurs constructeurs de machines électriques, 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 pour les variantes A et B, les vitesses de rotation naturelles sont très nettement inférieures à 428 t/min.

La vitesse naturelle de la turbine étant de 316 t/min pour la variante A finale et de 355 t/min pour la variante B finale, 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.

4.1.7 Performances des turbogroupes

Puissance hydraulique

Le calcul de la puissance hydraulique considère la formule suivante:

$$P_h = 10^{-3} \rho Q_t g H(Q_t) \quad [\text{kW}]$$

avec	ρ	= masse volumique de l'eau soit ici 999.7	[kg/m ³]
	Q_t	= débit turbiné	[m ³ /s]
	g	= constante de gravité soit ici 9.805	[m/s ²]
	$gH(Q_t)$	= énergie massique pour le débit turbiné Q_t	[J/kg]
	$H(Q_t)$	= hauteur de chute nette pour le débit turbiné Q_t	[m]

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

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

avec	ΔZ	= dénivellation entre les niveaux d'eau amont et aval	[m]
	v_2	= vitesse de l'eau en sortie d'aspirateur	[m/s]
	Q_t	= débit turbiné	[m ³ /s]
	Q_{\max}	= débit d'équipement de la turbine	[m ³ /s]

Rendements

Le rendement global est défini comme le produit du rendement mécanique par le rendement de la génératrice.

Le rendement mécanique est ici défini par la formule suivante:

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

avec:

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

D'où:

$$\eta_{\text{mécanique}}(Q_t) = 0.99 \cdot 0.95 \cdot \eta_{\text{turbine}}(Q_t) = 0.9405 \cdot \eta_{\text{turbine}}(Q_t)$$

Le rendement de la génératrice est donné selon des débits relatifs au débit d'équipement, comme montré sur la Figure 5.

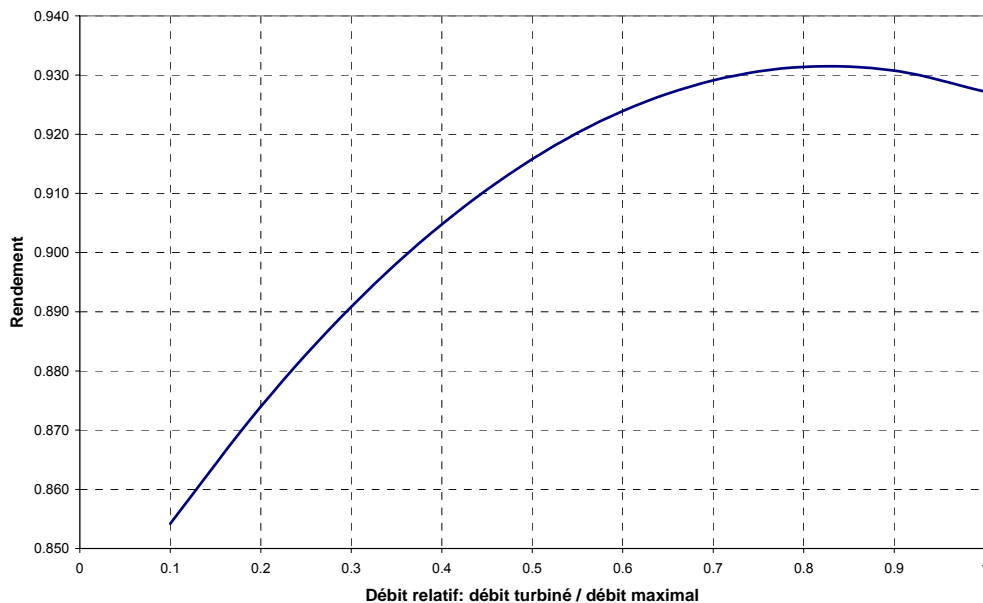


Figure 5. Courbe- type de rendement de la génératrice

Les figures 6 et 7 présentent l'évolution du rendement en fonction des débits turbinés, respectivement pour la variante A et la turbine réglable de la variante B, selon les calculs exposés ci-dessus.

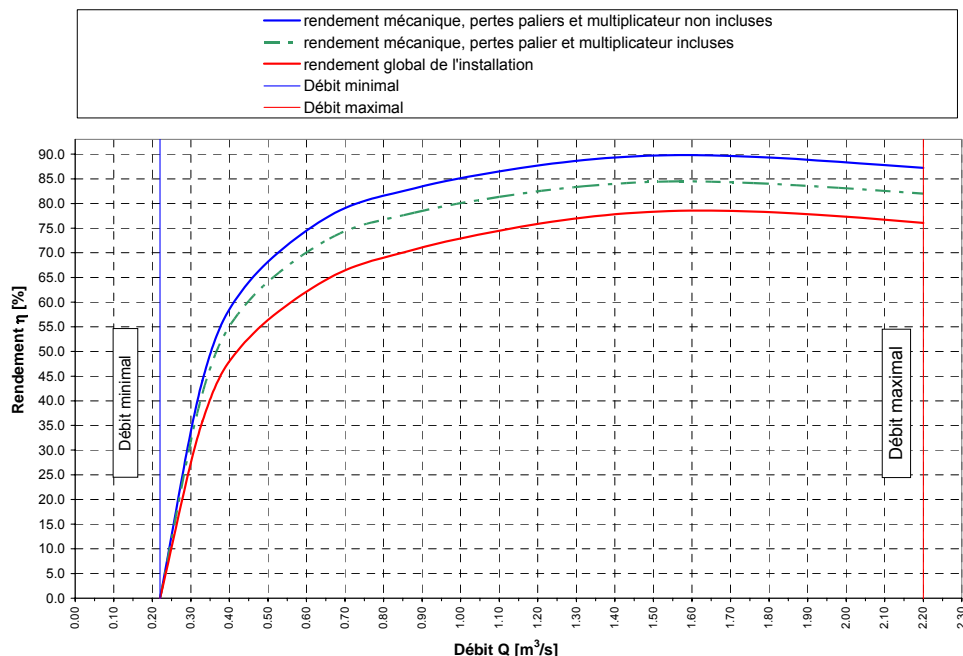
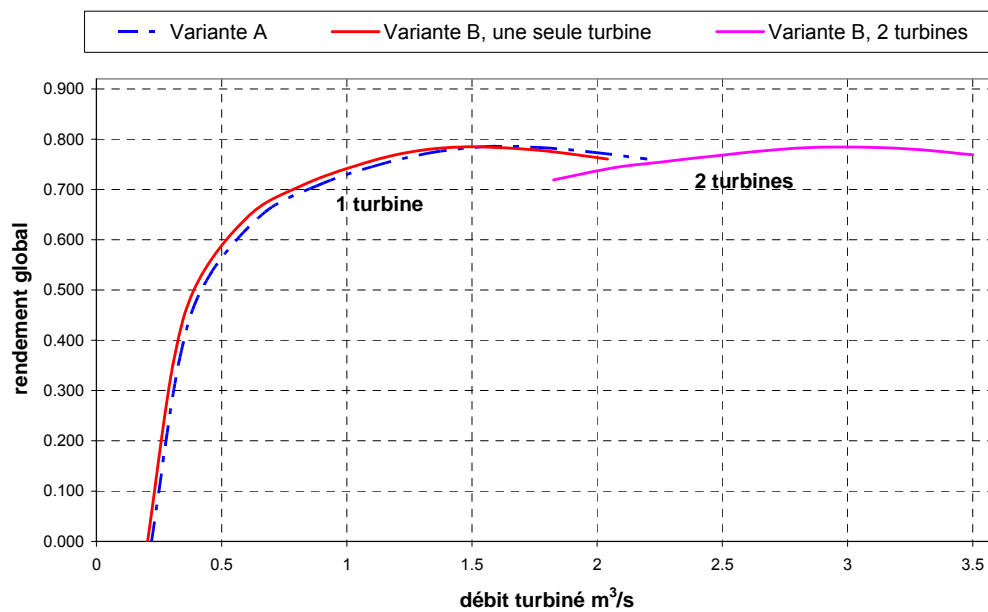
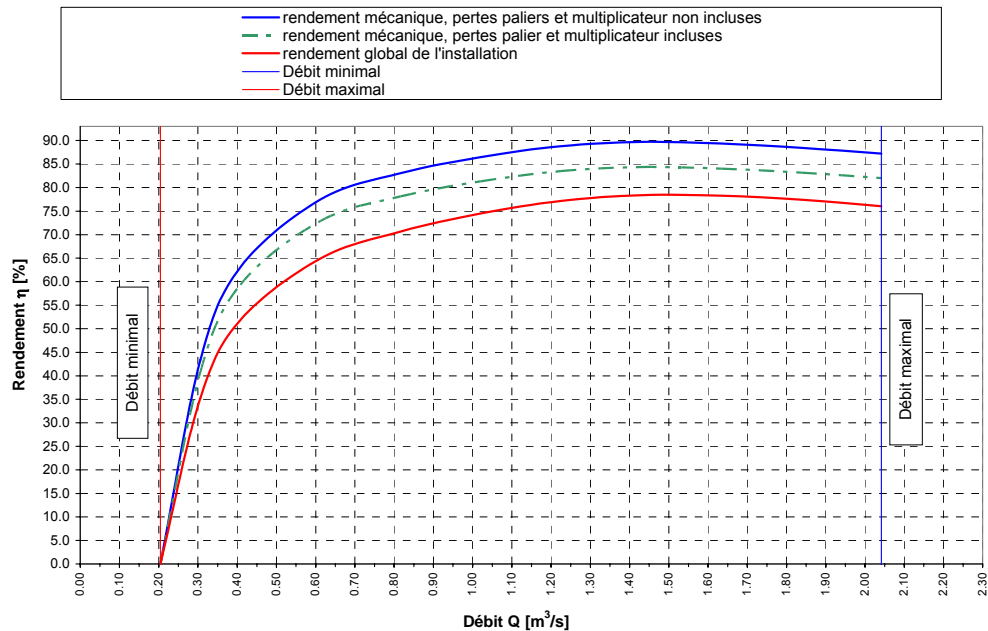


Figure 6. Evolution du rendement en fonction du débit: rendement turbine, rendement mécanique et rendement global pour la turbine de la variante A

La Figure 8 compare directement le rendement global des deux variantes. On peut noter que pour les deux variantes, une production est assurée jusqu'à 10 % du débit d'équipement.



Puissances électriques

La Figure 9 présente l'évolution de la puissance électrique en fonction du débit. On peut considérer que le gain de puissance entre la variante A et la variante B lorsqu'une seule turbine fonctionne est moindre. En effet, les deux turbines sont relativement proches. Par contre, ce graphe montre que, lorsque le débit disponible est supérieur à 2 m³/s, la puissance pour la variante A stagne autour des 70 kW, celle de la variante B peut atteindre les 118 kW.

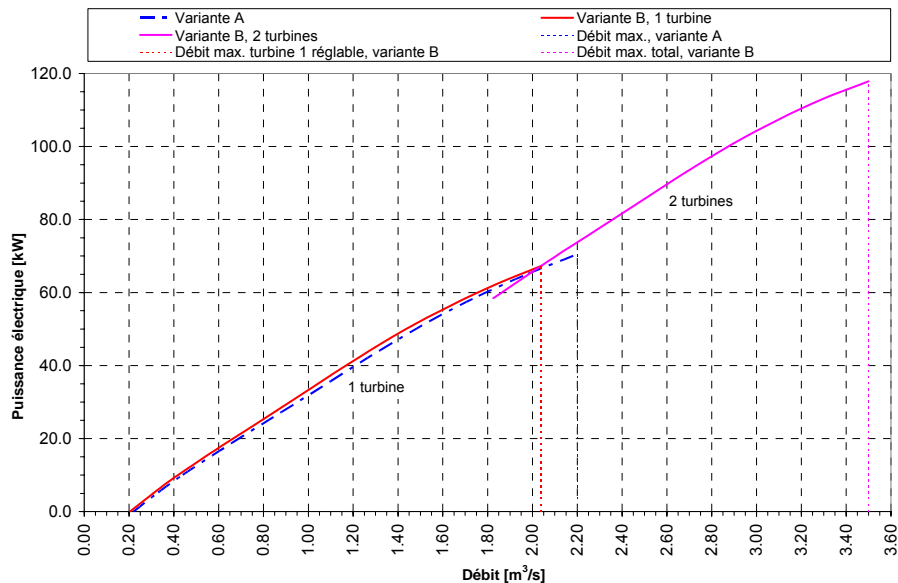


Figure 9. Evolution de la puissance électrique en fonction du débit pour les deux variantes A et B

Productions électriques annuelles

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

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

$$\rho = \text{masse volumique de l'eau, soit ici } 999.7 \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$g = \text{constante de gravité, soit ici } 9.805 \quad [\text{m/s}^2]$$

$$\int Q_t \eta(Q_t) H(Q_t) dt : \text{intégration en fonction des débits turbinés}$$

où $Q_t = \text{débit turbiné} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$

$$\eta(Q_t) = \text{rendement global, fonction du débit,} \quad [-] \text{ produit des}$$

et $H(Q_t) = \text{chute nette fonction du débit turbiné} \quad [\text{m}]$
et de la vitesse en sortie de turbine

De plus, à cette production est enlevé un pourcentage de jours d'arrêt du groupe pour révision, entretien ou débit disponible insuffisant, soit un maximum de 10 jours par an, selon les recommandations du mandant. Toutefois, il est à noter que 5 jours d'arrêt par an est la moyenne qui ressort de l'expérience acquise par MHyLab forte d'une trentaine de turbines installées.

La Figure 10 montre les deux courbes des puissances classées pour les variantes A et B. Il apparaît que le principal gain de production se fait 110 jours dans l'année, quand le débit est supérieur à 2.2 m³/s. Ce gain est représenté sur le graphe par la surface hachurée et est de l'ordre de 100'000 kWh/an. Soit une production électrique pour la variante B environ 1.3 fois supérieures à celle de la variante A.

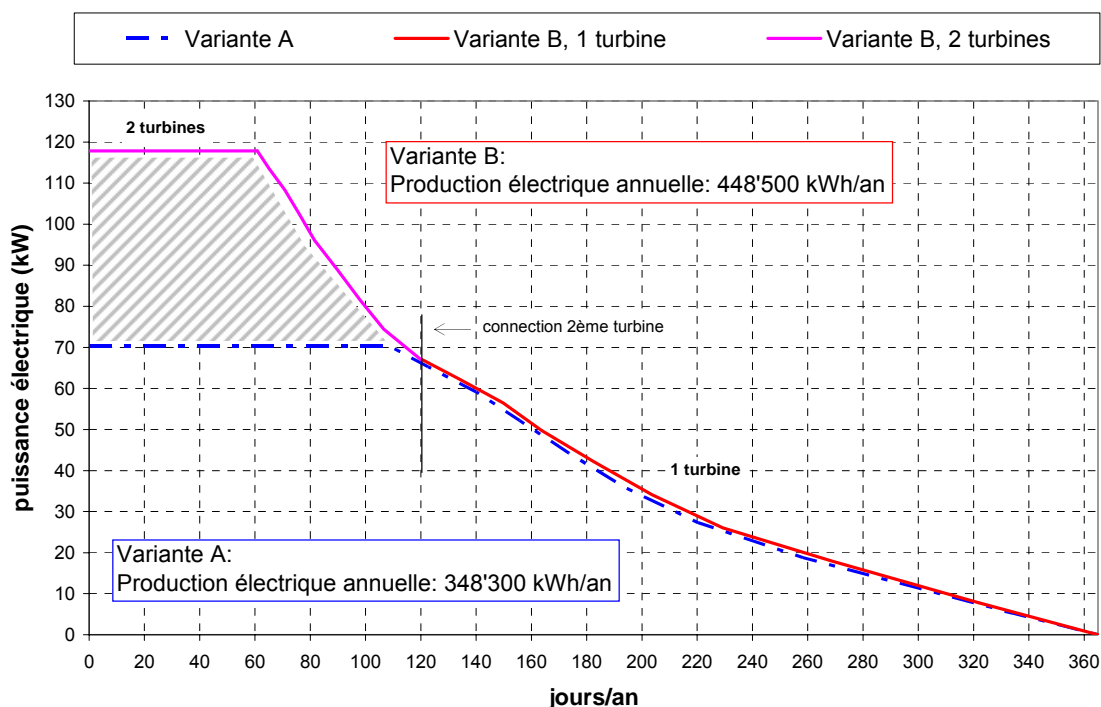


Figure 10. Comparaison des puissances classées des variantes A et B, avec en hachure le principal gain de production dû à la variante B

Le graphe montre également que, pour les deux variantes, les turbines fonctionnent toute l'année (selon la courbe des débits classés). De plus, pour la variante B, la turbine à pales fixes fonctionne 120 jours par an, tandis que celle à pales réglables fonctionne toute l'année.

Les productions électriques annuelles de 348'300 kWh/an et 448'500 kWh/an prennent en compte l'arrêt de 10 jours par an pour révision du turbogroupe.

4.1.8 Principaux aménagements

Les plans des turbogroupes pour les variantes A et B sont donnés en annexe, de même que les plans de génie civil correspondants.

		A	B
Ouvrage amont	Bassin de captage	Rénovation	Rénovation
	Canal supérieur	Reconstruction du muret actuel et rehaussement de 70 cm, pas d'élargissement, création d'un petit bassin à l'entrée de la turbine	Reconstruction complète du canal avec rehaussement du mur de 70 cm, avec élargissement
Ouvrage turbine	Local de turbinage	Local actuel	Nouvel emplacement
	Entrée de la turbine	Avec un coude à section carrée	En chambre d'eau
	Sortie de la turbine	Aspirateur sans coude d'aspiration	Aspirateur sans coude d'aspiration
	Excavation relativement au niveau actuel	Environ 2 m	Environ 1.3m
Ouvrage aval	Canal inférieur	Curage, élargissement uniquement sur les 10 premiers mètres	Elargissement
Raccordement électrique		A proximité	Nécessité d'installer une nouvelle ligne d'une centaine de mètres

Tableau 1. Principales caractéristiques des aménagements pour les variantes A et B

4.1.9 Résumé des principales caractéristiques techniques des variantes A et B

Le Tableau 2 fait le bilan des principales caractéristiques techniques des variantes A et B, décrites dans les paragraphes précédents.

	Variante		A	B
Site	Altitude niveau amont	Z_0 (m)	737.40	737.40
	Altitude niveau aval	Z_3 (m)	732.90	732.77
	Débit total	Q_{tot} (m ³ /s)	2.20	3.50
	Dénivellation	ΔZ (m)	4.50	4.63
Turbogroupe	Type de turbine	(-)	turbine axiale	turbine axiale
	Orientation de l'axe	(-)	vertical	vertical
	Nombre de pales	(-)	4	4
	Nombre de Turbines	Z_T (-)	1	2
	Vitesse de l'eau sortie turbine	v_2 (m/s)	2	2
	Rayon externe de la roue	Re (m)	0.431	0.412
	vitesse de rotation	N' (t/min)	316	335
	Hauteur d'aspiration maximale	H_{smax} (m)	5.6	5.5
	Puissance électrique totale maximale	P_{tot} (kW)	70	118
	Energie électrique annuelle totale	E (kWh/an)	348'300	448'500
Turbine 1	Type de réglage		Pales réglables	Pales réglables
	Débit turbine	Q_1 (m ³ /s)	2.2	2.0
	Hauteur de chute nette à Qmax	H_1 (m)	4.30	4.43
	Puissance hydraulique	P_{h1} (kW)	93	88
	Puissance mécanique maximale de la turbine	P_{m1} (kW)	76	72
	Puissance électrique maximale de la turbine	P_{e1} (kW)	70	67
	Production électrique de la turbine	E_1 (kWh/an)	348'300	306'600
turbine 2	Type de réglage			Pales fixes
	Débit turbine	Q_2 (m ³ /s)		1.5
	Hauteur de chute nette à Qmax	H_2 (m)		4.53
	Puissance hydraulique	P_{h2} (kW)		65
	Puissance mécanique maximale de la turbine	P_{m2} (kW)		55
	Puissance électrique maximale de la turbine	P_{e2} (kW)		51
	Production électrique de la turbine	E_2 (kWh/an)		141'900

Tableau 2. Principales caractéristiques techniques pour les variantes A et B

4.2 Etude économique comparative des variantes A et B

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%**. Elle sera ensuite approfondie pour la variante retenue au paragraphe 6.

L'analyse économique prend en compte les points suivants:

- Les frais divers et imprévus, les horaires d'ingénieurs sont inclus dans les coûts annoncés.
- En électromécanique, l'estimation des coûts a été faite en se basant sur des réalisations comparables.
- Les coûts de raccordement ont été calculés à partir de formules statistiques fonction de la longueur de la ligne et de la tension.
- L'analyse des coûts de génie civil a été réalisée par le bureau RWB, à partir de prix unitaires 2005, dont le détail se trouve en annexe E. Les travaux devisés sont ceux correspondant aux plans des annexes C et D.
- Dans cette étude économique comparative, les coûts correspondant à la mise en place de la ou des turbines ne sont pas inclus, de même que ceux dus aux sondages géotechniques éventuels, ou à l'évacuation des matériaux à la décharge.
- 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.
- Le prix de vente de l'électricité est fixé à 15cts/kWh selon les recommandations de l'Office Fédéral de l'Energie pour des producteurs indépendants. De plus, suite à la modification de la loi sur l'Energie du 30 novembre 2004, ce tarif devrait être garanti sur le long terme grâce à la possibilité offerte aux distributeurs de facturer, à la société exploitant le réseau THT, les frais supplémentaires encourus du fait de l'achat de l'énergie électrique fournie par des producteurs indépendants.
- Le taux d'intérêt considéré dans cette étude est de 4 %, selon les recommandations du mandant.
- L'analyse économique se base sur un remboursement de l'emprunt par annuités constantes.
- Suivant la demande du mandant, l'étude économique se base sur un coefficient d'annuité pondéré, en prenant en compte les durées d'amortissement suivantes:
 - 15 ans pour l'appareillage,
 - 25 ans pour l'électromécanique,
 - 50 ans pour le génie civil.

- La totalité de l'investissement provient soit d'un emprunt bancaire, soit de capitaux propres rémunérés au même taux.
- Les frais d'investissement sont comptabilisés la première année de production.
- 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 (soit 5'000 CHF/an pour la variante A et 8'000 CHF/an pour la variante B de frais d'exploitation).

	Var A	Var B
Turbine, alternateur, vanne, grille	220'000	440'000
Raccordement électrique	30'000	60'000
Total électromécanique	250'000	500'000

Tableau 3. Coûts de l'électromécanique en CHF

	Variante		A	B
investissement	Electromécanique	CHF	250'000.-	500'000.-
	Appareillage	CHF	50'000.-	50'000.-
	Génie civil centrale	CHF	300'000.-	530'000.-
	Investissement total	CHF	600'000.-	1'080'000.-
frais	Frais d'exploitation	CHF/an	5'000.-	8'000.-
Vente de l'électricité	Production annuelle	kWh/an	348'300	448'500
	tarif de vente	cts/kWh	15	15
	Chiffre d'affaire brut	CHF/an	52'250.-	67'250.-
Calculs économiques	Taux d'intérêt	%	4.00	4.00
	Durée moyenne d'amortissement pour l'appareillage		15	15
	Durée moyenne d'amortissement pour l'électromécanique	ans	25	25
	Durée moyenne d'amortissement pour le génie civil	ans	50	50
	Coefficient d'annuité	%	5.74	5.66
	Annuité fixe	CHF/an	34'450.-	61'150.-
	Bénéfice annuel	CHF/an	12'750	-1'900
	Prix de revient moyen	cts/kWh	11.3	15.2

Tableau 4. Approche économique moyenne des variantes A et B

Malgré une production électrique annuelle 1.3 fois supérieure par rapport à la variante A et donc une utilisation optimale de la ressource en eau, la variante B correspond à un prix de revient moyen proche du prix de vente de 15 cts/kWh, contrairement à celui de la variante A qui lui est largement inférieur.

Ainsi, suite à la présentation de ces chiffres lors d'une rencontre avec M. Zaech le 7 décembre 2005, la variante A a été retenue et fait l'objet d'un approfondissement dans les chapitres suivants.

5 Analyse technique détaillée de la variante A

5.1 Rappel des caractéristiques de base de la variante A

Altitude niveau amont	Z_0 (m)	737.40
Altitude niveau aval	Z_3 (m)	732.90
Débit total	Q_{tot} (m^3/s)	2.20
Dénivellation (différence d'altitude entre niveaux amont et aval)	ΔZ (m)	4.50
Chute nette (en considérant une vitesse résiduelle de l'eau à la sortie de la turbine de 2 m/s.	H_n (m)	4.30

Tableau 5. Rappel des caractéristiques de base de la variante A

5.2 Equipement hydromécanique

5.2.1 Turbine

Les indications fournies pour la turbine sont issues des travaux MHyLab. Elles 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. Ainsi, les caractéristiques annoncées sont réalistes, pour autant que la turbine soit construite conformément à un profil issu de développement en laboratoire.

Type de turbine		turbine axiale
Nombre de pales	(-)	4
Nombre de Turbines	Z_T (-)	1
Débit maximal	Q_{max} (m^3/s)	2.20
Débit minimal	Q_{min} (m^3/s)	0.22
Hauteur de chute nette à Q_{max}	H (m)	4.30
Energie massique à Q_{max}	$g H$ (J/kg)	42.2

Type de réglage		Pales réglables
Ouverture du distributeur fixe	(°)	40
Hauteur d'aspiration maximale	Hs (m)	5.6
Diamètre externe de la roue	De(m)	0.862
Vitesse de rotation	N' (t/min)	316
Vitesse d'emballement maximale	N' _r (t/min)	717
Hauteur d'implantation de la roue par rapport au niveau d'eau aval	Hs (m)	1.275
Puissance mécanique maximale de la turbine	P _m (kW)	76

Tableau 6. Caractéristiques principales de la turbine pour la variante A

Un plan de la turbine se trouve en annexe A.

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'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.

5.2.2 Multiplicateur de vitesse

La turbine sera équipée d'un multiplicateur de vitesse à courroie. En effet, la prise directe demanderait une génératrice à 9 ou 10 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.

5.2.3 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 1300 mm, et devrait avoir également l'avantage d'être bon marché.

5.2.4 Grille

Une grille de dimensions: 2.00 x 1.50 m est nécessaire. Le canal supérieur étant couvert pour éviter la prolifération des algues, elle sera installée au niveau de l'entrée de ce canal. Deux positions se justifient, et seront précisées dans le projet d'exécution:

- La grille peut être installée devant la vanne batardeau, de façon à faciliter la manipulation de cette vanne,
- La grille peut être installée derrière la vanne batardeau, de façon à faciliter le nettoyage de cette grille.

Il conviendra d'évacuer régulièrement et manuellement les cailloux et autres débris qui viendraient obstruer cette grille.

De plus, une purge est prévue dans la chambre de mise en charge afin d'évacuer les limons entraînés dans le canal supérieur. Enfin, un trou d'homme sera intégré dans le plat de la section d'entrée de la turbine pour accéder facilement à l'intérieur du bâti et évacuer d'éventuels détritiques qui auraient passé au travers de la grille.

5.2.5 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'armoire 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.

Afin de limiter les travaux dans le locatif, qui se révèlent être très lourds vu les rares murs porteurs et qui ne peuvent financièrement se justifier par le projet de turbinage, la mise en place de la turbine se fera du côté de la Noiraigue.

Les pièces les plus lourdes seront **héliportées** de la cour de la maison et posées sur le terre-plein situé entre la Noiraigue et le canal inférieur, c'est-à-dire face à la porte du local de turbinage actuelle. Il s'agira d'optimiser ce transport par hélicoptère afin de limiter les coûts.

Bien que pouvant paraître surprenante, cette proposition a déjà fait de nombreuses fois ses preuves technique et économique en cas d'accès difficile au site.

Le terre-plein sera renforcé notamment d'une dalle, tandis que la porte d'entrée du local de turbinage sera élargie de façon à recevoir les différentes pièces du turbogroupe.

Chaque pièce sera ensuite amenée dans le local de turbinage sur 4 **rouleurs**. Ces rouleaux pourront également servir à amener les pièces les moins lourdes depuis la cour jusqu'au local de turbinage par l'intérieur de la maison, afin de limiter les coûts de l'héliportage.

Ensuite les pièces seront 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. Le schéma de principe d'une installation comparable est joint en annexe.

Vu leur faible période d'utilisation, l'achat des 4 rouleaux 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.

5.3 Equipement électrique

5.3.1 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
Vitesse d'emballement	t/min	2330
Puissance électrique	P_{el}	70
$\cos \varphi$		0.9
Puissance apparente	kVA	78
Classe de protection		IP23
Classe de refroidissement		IC 01

Tableau 7. 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.

5.3.2 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, c'est-à-dire au point haut du muret du canal supérieur. 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 $\cos \varphi$ (si non inclus dans l'alternateur).

Les indicateurs suivants seront à fournir :

- Voltmètre, wattmètre, fréquencemètre, mesure du $\cos \varphi$, 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 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.

5.3.3 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.

5.3.4 Raccordement électrique

Le raccordement électrique se fera au réseau local de la Société Electrique du Val de Travers et utilisera la ligne d'arrivée de courant dans l'immeuble n°9 de la rue du Moulin à Noiraigue, suivant les informations transmises par M. Zaech.

5.4 Génie civil

Les travaux de génie civil sont motivés par deux nécessités:

- celle d'amener le débit de $2.20 \text{ m}^3/\text{s}$ à la turbine, et de l'évacuer,
- celle d'aménager le local de turbinage pour y intégrer l'électromécanique.

Un relevé sur place de l'état existant a été nécessaire pour pouvoir tracer un profil en long hydraulique du cours d'eau actuel et des infrastructures existantes.

Le détail des travaux par partie d'ouvrage est décrit dans les chapitres suivants, lesquels se réfèrent au plan 05C67-300 fourni avec le présent rapport.

5.4.1 Bassin de captage

Ce bassin situé directement après la sortie de la source assurera le débit de $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'ensemble des sources existantes se situent dans l'emprise du projet, et seront captées par le bassin de captage. Celui-ci est actuellement rempli de pierre provenant de la montagne en amont, ce qui a pour effet de provoquer le déversement de beaucoup d'eau par-dessus le mur délimitant ce bassin.

Le nouveau bassin aura les caractéristiques suivantes :

- Largeur de 3.30 m actuelle conservée.
- Longueur inchangée, environ 22 m
- Pente actuelle conservée, environ 4.0 %



Vue du bassin de captage depuis l'amont

Les travaux suivants seront entrepris afin de répondre au nouveau profil :

- Mise en place d'un batardeau provisoire pour exécuter les travaux hors d'eau.
- Enlèvement des blocs du lit actuel, et mise en dépôt dans la rivière en contre bas, pas d'évacuation à la décharge de ces blocs.

- Construction d'un nouveau lit avec des enrochements bétonnés ou nouveau fond en béton, surface environ 80 m².
- Construction d'un nouveau mur de retenue en béton armé lié avec le radier, longueur environ 24 m.
- Mise en place d'une vanne batardeau de 1.30 x 1.20 et de capacité de 2.5 m³/s.

La prise d'eau d'alimentation des fontaines sera maintenue dans sa configuration actuelle. Une nouvelle conduite pourrait être posée, mais le niveau et le point de départ doivent être maintenus.

La construction d'un nouveau lit en béton simplifie l'entretien et l'enlèvement des nouveaux blocs qui viendraient à tomber. Cette manière de réaliser le fond devra encore obtenir les autorisations des services de l'Etat.

5.4.2 Canal supérieur

Le but du canal supérieur est d'amener l'eau vers la turbine à une vitesse très faible. Le canal actuel, constitué d'un mur en pierre dont les moellons sont complètement descellés, ne peut pas être conservé et modifié dans cet état. Celui-ci sera totalement reconstruit.



Vue du mur actuel constituant le canal supérieur

Les données géométriques du futur canal sont les suivantes :

- Largeur actuelle conservée : 165 cm.
- Hauteur : + 70 cm par rapport au mur actuel, donc une nouvelle profondeur de 120 cm.
- Longueur du canal inchangée : environ 20 m.



Vue du canal actuel depuis l'amont

Il est prévu de reconstruire un nouveau canal de section rectangulaire, avec une dalle de couverture. Nous préconisons une couverture avec une dalle en béton armé, liée aux murs pour répondre aux problèmes de stabilité du canal. En effet, la section carrée permet une reprise beaucoup plus aisée des efforts latéraux qu'une section en "U".

Une grille sera installée à l'entrée de ce canal supérieur comme décrit dans le paragraphe 5.2.4.

Une ouverture d'aération est notamment prévue au niveau de l'entrée de la turbine pour limiter la mise en charge de ce canal.

Les étapes de construction sont les suivantes :

- Démolition du mur actuel et stockage des blocs sur place.
- Terrassements par étapes et ponctuels devant la maison jusqu'au bon terrain pour assise des semelles.
- Reprises en sous-œuvre éventuelles selon le niveau de fondation du mur de la maison.
- Bétonnage des semelles de fondation et des murs voiles sous le futur canal.
- Construction des semelles par étape, afin de ne pas déstabiliser le bâtiment.
- Coffrage et bétonnage du « U » en béton armé constituant le nouveau canal.
- Bétonnage de la dalle de couverture avec des prédalles comme coffrage

Ce nouvel ouvrage sera complètement indépendant de la maison, et une grande incertitude subsiste quant au niveau des fondations sur le rocher ou sur un sol de bonne qualité. Ce niveau de fondation sera déterminé au moment des terrassements, et les hauteurs de semelles seront adaptées en fonction des niveaux rencontrés.

5.4.3 Local de turbinage

D'importants travaux seront entrepris à l'intérieur afin de pouvoir mettre en place la turbine dans la maison actuelle, et non à l'extérieur du bâtiment.



Emplacement de la turbine future

De nouveaux murs et dalles en béton armé seront créés afin de recevoir la turbine, ainsi qu'une surprofondeur de la fosse actuelle de 2.0 m. Ces travaux seront exécutés dans la maison existante.

- Surface de la fosse environ 3.0 x 2.0 m.
- Nouvelle profondeur totale environ 2.50 m.

Les étapes d'exécution des travaux sont les suivantes :

- Etayage des murs si nécessaire.
- 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 d'appui de la turbine.

L'ensemble de ces travaux sera exécuté en petites étapes et 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 de la maison. De plus, ce sont des travaux s'effectuant à l'intérieur du bâtiment.

5.4.4 Canal inférieur

Un minimum de travaux est prévu sur ce canal, ceci afin de réduire les coûts de génie civil. Le canal de sortie sera élargi uniquement sur les 10 premiers mètres, et approfondi au niveau de la fosse de sortie de la turbine.

Le lit actuel sera curé et une vanne- batardeaux sera posée avant le rejet à la Noiraigue, pour mettre hors d'eau ce canal.



Vue du canal inférieur depuis l'aval

Les étapes d'exécution des travaux sont les suivantes :

- Mise en place de la vanne batardeau définitive en aval pour assécher le canal.
- Démolitions du mur actuel et terrassement pour construction de la fosse.
- Complément de fouilles à la main dans la fosse actuelle pour reprises en sous-œuvre sous les murs existants.
- Bétonnage du radier et de la rampe de la nouvelle fosse.
- Bétonnage par étapes des nouveaux murs.
- Curage du lit actuel.

Aucune intervention contre les murs de la maison existante ou sous le pont n'est prévue.

5.4.5 Vannes batardeaux

En cas normal, c'est-à-dire **lors du turbinage**, la vanne en amont du canal supérieur est ouverte, tandis que celle du bassin de captage est fermée. L'ensemble de l'eau ainsi captée est acheminé jusqu'à la turbine.

La **crête déversante** au bout du canal, à une altitude de 737.40 m tout comme le niveau d'eau amont de la turbine, sert au rejet de l'eau que la turbine ne peut absorber, le surplus maximum étant de 2.2 m³/s. Les débits supérieurs à 2.2 m³/s sont donc déversés à la Noiraigue sur le mur du bassin de captage, et ceci sur toute sa longueur, ce qui correspond au déversement actuel.

La **vanne en amont du canal supérieur** sert à la mise hors d'eau de ce canal et des installations de turbinage, nécessaire lors d'entretiens. La vanne du bassin de captage peut alors être ouverte, pour envoyer les eaux directement à la Noiraigue. Si la vanne reste fermée, les eaux se déversent par-dessus le mur du bassin de captage.

Lors de la mise hors eau des installations, la vanne située sur le canal inférieur sera également fermée, ceci afin d'éviter les retours d'eau depuis la Noiraigue

Une purge au point bas du canal supérieur est prévue afin de pouvoir extraire sans pompage les matériaux qui se seraient déposés au fond du canal.

Les mesures de déviation provisoire des eaux pour l'exécution des travaux seront définies dans le cahier des charges lors de l'exécution du projet définitif.

6 Analyse économique détaillée de la variante A

6.1 Investissements

6.1.1 Electromécanique et appareillage

L'estimation des coûts a été faite en se basant sur des réalisations récentes comparables et des offres préliminaires, soit avec une précision de $\pm 10 \%$.

Montage et mise en service

Hélicoptage	4'000.-
Système de chariots	2'000.-
Montage sur site (location des rouleaux et des palans incluse)	10'000.-
Total pour le montage et la mise en service du turbogroupe	16'000.-

Tableau 8. Investissements pour le montage et la mise en service du turbogroupe en CHF

Il est à noter qu'il est possible notamment de réduire les coûts de l'hélicoptage, en optimisant les déplacements de l'hélicoptère (plus de la moitié du coût annoncé) et le choix de l'hélicoptère. Les coûts d'assurance ne sont pas pris en compte ici.

Le coût du montage sur site comprend le chef monteur (6 jours de travail), les frais de déplacement et l'outillage (dont les rouleaux et les palans).

Les coûts de génie civil prendront en compte le renforcement du terre-plein et du pont jusqu'au local de turbinage, ainsi que la rénovation des murs porteurs du local de turbinage.

Investissements en électromécanique

Turbine + multiplicateur	184'500.-
Génératrice (1'000 t/min)	10'500.-
Vanne papillon	51'000.-
Grille	2'350.-
Transport	4'500.-
Raccordement électrique	2'500.-
Montage et mise en service du turbogroupe	16'000.-
Divers et imprévus, frais d'ingénierie	27'000.-
Total de l'électromécanique (hors taxe)	298'350.-
Total de l'électromécanique (TVA inc. à 7.6 %)	321'000.-

Tableau 9. Investissements en électromécanique en CHF

Les coûts du raccordement électrique ont été fournis par M. Zaech.

Le coût de la vanne papillon correspond à une vanne papillon standard. Ce coût pourrait être revu à la baisse dans le cas où le constructeur retenu serait en mesure de proposer une vanne papillon simplifiée.

Appareillage

Les armoires électriques de la centrale contenant les systèmes de sécurité, comptage et contrôle commande sont désignés par l'appellation appareillage.

Le montant devisé pour la fourniture de ces équipements est de CHF 51'000.-, hors taxe, soit CHF 54'900.-, TVA inc.

6.1.2 Génie civil

L'analyse des travaux et de leur coût a été réalisée par le bureau de génie civil RWB, qui a établi les devis à partir de prix unitaires 2005.

Les travaux devisés sont ceux figurant sur le plan annexe, comprenant notamment les démolitions et les nouvelles constructions.

Vu le nombre de données inconnues, comme la géotechnique, l'évacuation des matériaux, le niveau du toit du rocher, le niveau de fondation du bâtiment, l'état des murs, etc... la précision du devis est de plus ou moins 15 %.

Dans ces montants sont compris les installations de chantier, les divers et imprévus, et les honoraires d'ingénieurs civils pour l'exécution des travaux.

Par contre ne sont pas compris dans ces montants :

- Une étude et des sondages géotechniques éventuels.
- L'évacuation des matériaux à la décharge.

Bassin de captage	Travaux préparatoires	5'000	48'000
	Nouveau lit	20'300	
	Nouveau mur en béton	22'700	
Canal supérieur	Démolitions	5'000	70'000
	Terrassement	5'400	
	Fondations béton	10'800	
	U béton	30'000	
	Divers	18'800	
Local de turbinage	Fosse	33'500	37'500
	Dalle appui turbine	4'000	
Canal inférieur	Agrandissement de la sortie	40'100	54'500
	Curage du lit	14'400	
Installations chantiers, divers et imprévus, honoraires ingénieurs		84'000	84'000
Total des investissements de génie civil (hors taxe)		294'000	294'000
Total des investissements de génie civil (TVA inc.: 7.6 %)		316'500	316'500

Tableau 10. Investissements en génie civil

Le détail de ces montants est donné en annexe.

6.2 Frais d'exploitation

Les frais d'exploitation annuels, 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. Ils se montent à environ CHF 5'000.- par an.

6.3 Chiffre d'affaire, bénéfice annuel et prix de revient

Cette étude économique a pour but d'approcher le prix de revient du kWh électrique à **plus ou moins 15%**. Elle prend en compte les points suivants:

- Le prix de vente de l'électricité est fixé à 15cts/kWh selon les recommandations de l'Office Fédéral de l'Energie pour des producteurs indépendants. De plus, suite à la modification de la loi sur l'Energie du 30 novembre 2004, ce tarif devrait être garanti sur le long terme grâce à la possibilité offerte aux distributeurs de facturer, à la société exploitant le réseau THT, les frais supplémentaires encourus du fait de l'achat de l'énergie électrique fournie par des producteurs indépendants.
- Le taux d'intérêt considéré dans cette étude est de 4 %, selon les recommandations du Mandant.
- L'analyse économique se base sur un remboursement de l'emprunt par annuités constantes.

- Suivant la demande du Mandant, l'étude économique se base sur un coefficient d'annuité pondéré, en prenant en compte les durées d'amortissement suivantes:
 - 15 ans pour l'appareillage,
 - 25 ans pour l'électromécanique,
 - 50 ans pour le génie civil.
- La totalité de l'investissement provient soit d'un emprunt bancaire, soit de capitaux propres rémunérés au même taux.
- Les frais d'investissement sont comptabilisés la première année de production.
- 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.

Investissement	Electromécanique (raccordement et mise en place inclus)	CHF	321'00
	Appareillage (armoires électriques)	CHF	54'900
	Génie civil centrale	CHF	316'500
	Investissement total (TVA inc.)	CHF	692'400
Frais	frais d'exploitation standard	CHF/an	5'000.-
Vente de l'électricité	Production annuelle	kWh/an	348'300
	tarif de vente	cts/kWh	15
	Chiffre d'affaire brut	CHF/an	52'250.-
Calculs économiques	taux d'intérêt	%	4.00
	Durée d'amortissement Génie civil	ans	50
	Durée d'amortissement Electromécanique	ans	25
	Durée d'amortissement Appareillage	ans	15
	Coefficient d'annuité pondéré	%	5.81
	Annuité	CHF/an	40'200.-
	Bénéfice annuel	CHF/an	7'050.-
	Prix de revient	cts/kWh	13.0

Tableau 11. Analyse des coûts avec un tarif de vente de 15 cts/kWh

6.4 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité consiste à analyser la variation de rentabilité du projet lorsque l'on y applique des variations sur les hypothèses relatives à chacune des composantes de l'échéancier des flux de trésorerie.

Il faut en effet se rappeler que l'incertitude sur les coûts déterminés pour les équipements est de $\pm 10\%$, celle sur le génie civil étant de $\pm 15\%$, compte tenu des inconnues liées à l'état du bâtiment existant et à l'excavation dans le local de turbinage.

Par ailleurs, les variations de production sont estimées à partir des variations annuelles dues à l'hydrologie et calculées pour les années 1959 à 2003. Celles-ci sont de l'ordre de $\pm 25\%$.

Dans le cas du moulin de Noiraigue, nous avons considéré les possibilités suivantes :

- Evolution favorables des coûts de génie civil et du matériel électromécanique. Cette possibilité correspond par exemple au cas où le Maître d'œuvre apporte une attention particulière au choix des fournisseurs de prestations et matériel.
- Evolution défavorable des coûts de génie civil et du matériel électro-mécanique. Cette possibilité correspond par exemple au cas où un renchérissement global interviendrait dans le domaine de la petite hydro-électricité.
- Evolution favorable de la production.
- Evolution favorable de la production et des investissements

Variante A		GC+EM favorables		GC+EM défavorables		Production favorable		Tout favorable	
Production annuelle	kCHF/an		52		52	+25%	65	+25%	65
Electromécanique	kCHF	-10%	289	10%	353		321	-10%	289
Appareillage	kCHF		55		55		55		55
Génie civil	kCHF	-15%	269	15%	364		316	-15%	269
Total des investissements	kCHF		613		772		692		613
Frais annuels	kCHF/an		5		5		5		5
Coefficient d'annuités pondéré	%		5.87		5.76		5.81		5.87
Prix de revient du kWh	cts/kWh		11.8		14.2		10.4		9.4
Bénéfice annuel	kCHF/an		11.3		2.8		20.1		24.4

Tableau 12. Analyse de sensibilité pour la variante A (GC: Génie Civil, EM: Electro-Mécanique)

7 Etude du raccourcissement du tube d'aspiration de la variante A

Variante proposée par M. ZAECH :

Diminuer le plus possible la longueur du tube d'aspiration pour réduire le volume des excavations sous la turbine.

Remarque préliminaire :

L'étude d'avant projet de MHyLab résulte de la recherche suivante : produire le maximum d'énergie en respectant le gabarit du bâtiment existant. Toutefois, compte tenu de la difficulté (et par conséquent le coût), selon le Bureau RWB, d'excaver profondément la fosse de la turbine, la variante de M. ZAECH pourrait économiquement se justifier.

Diminution maximale de la longueur du tube d'aspiration.

Le gain en hauteur ne peut excéder 1,0 m. En effet, au-delà, les perturbations de l'écoulement dans la vanne "papillon" risquent fortement de générer des décollements dans la première partie du diffuseur (cône à 4° sous la roue motrice). Il y a lieu de rappeler que, dans le cas de Noiraigue, l'aspirateur récupère environ 16 % de la puissance de la turbine à pleine charge.

Réduction du coût de l'excavation si la profondeur de celle-ci est diminuée de 1,0 m et réduction correspondante de la production de la PCH

Selon le Bureau RWB, cette réduction serait d'environ CHF 30'000,--.

Le diamètre effectif de sortie de l'aspirateur est réduit de 1,185 à 1,017 m et la vitesse de sortie augmente de 2,0 à 2,71 m/s. Cette modification n'affecte pas le rendement de la turbine, mais réduit la hauteur de chute nette de l'installation et, par conséquent, la production annuelle qui passe de 348'300 à 338'000 kWh.

Réduction de l'investissement global possible résultant de la perte de production

On se réfèrera à la note MHyLab jointe en annexe: *Relation entre le rendement énergétique d'une PCH et son coût de construction*. On considère l'expression de la page 2 de cette note :

$$\Delta C = \frac{r_v \cdot (E_1 - E_2)}{a} \quad [\text{CHF}]$$

avec : ΔC = réduction de l'investissement [CHF]

r_v = prix de vente du kWh = 0,15 [CHF/kWh]

E_1 = production issue de l'étude de faisabilité = 348'300 [kWh/an]

E_2 = production avec un tube d'aspiration raccourci = 338'000 [kWh/an]

a = coefficient d'annuité pondéré admis pour l'étude de faisabilité
= 0,0581 [-]

d'où
$$\Delta C = \frac{0,15 \cdot (348'300 - 338'000)}{0,0581} = 26'600,-- \quad [\text{CHF}]$$

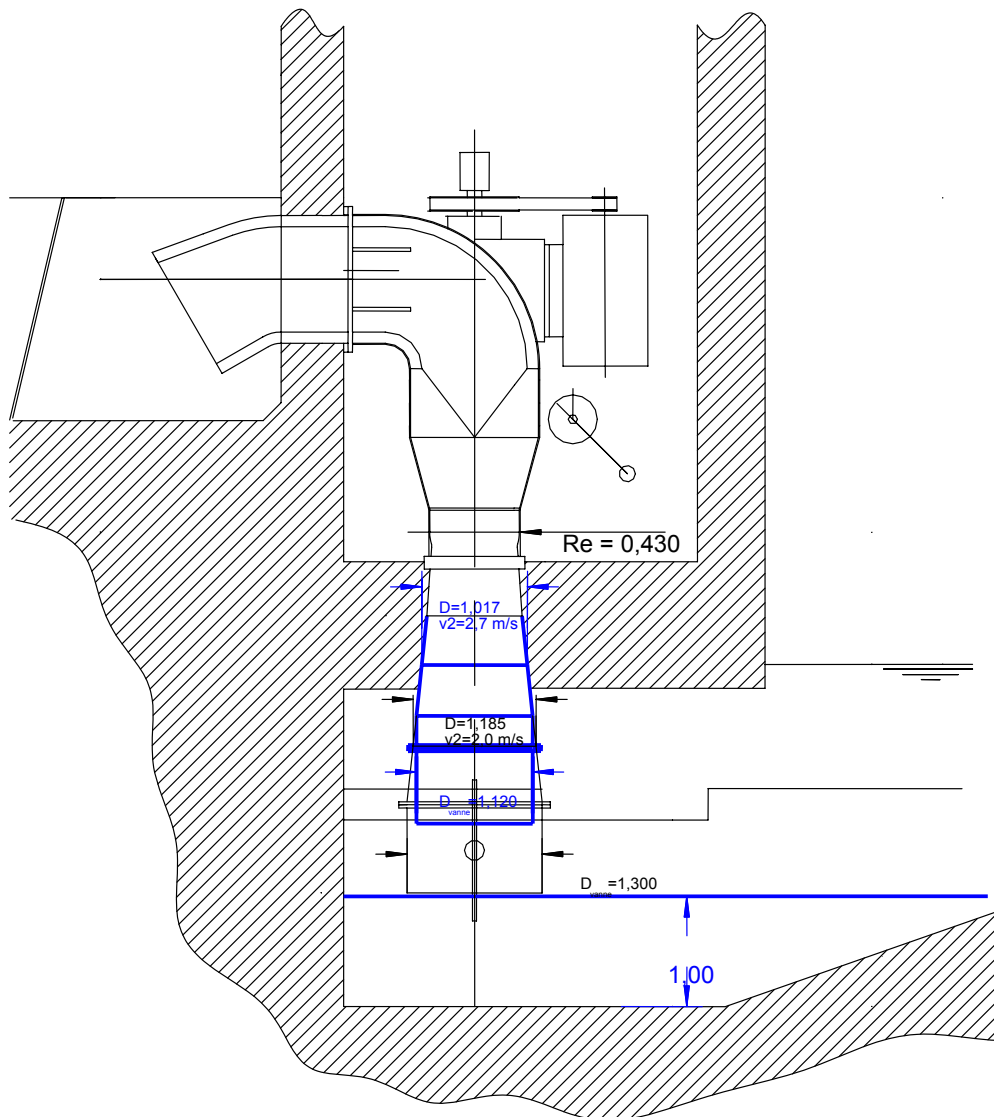


Figure 11. Etude du raccourcissement du tube d'aspiration pour la variante A

En conclusion

On observe donc que la réduction de la longueur de l'aspirateur conduirait à un gain effectif sur l'investissement de $30'000 - 26'600 = \text{CHF } 3'400,--$. Face à un gain aussi faible, il convient d'ajouter que :

1. Le coût de l'excavation de la fosse de la turbine a été évalué avec beaucoup de prudence par le Bureau RWB. En raison des incertitudes liées à ce travail, il est légitime, dans cette phase d'étude de faisabilité, de prendre en compte des marges d'erreur élevées. On peut donc raisonnablement estimer que le coût de l'excavation sera effectivement plus faible.
2. Tout en conservant la longueur optimale de l'aspirateur, on pourra certainement réduire sensiblement la profondeur de l'excavation dans la phase du dimensionnement final. Par exemple : réduction de la longueur de la vanne, diminution de la hauteur de dégagement sous la vanne, augmentation de l'angle du cône divergeant

précédant la vanne de 6° à 8°. Observons que, sur la base du calcul de RWB, il suffirait de réduire de 18,7 cm la profondeur de la fosse pour "gagner" CHF 3'400,-.

3. Le risque d'un dysfonctionnement de la turbine (instabilité) comportant un aspirateur raccourci n'est pas à exclure. On pourrait s'assurer du contraire seulement en testant un tel dispositif en laboratoire. Cette expérience n'a pas été réalisée à MHy-Lab et, probablement, nulle part ailleurs.
4. Pour absorber le même débit, sous une chute plus faible, la turbine sera un peu plus grosse et tournera à une vitesse plus faible. Si ce dernier point est sans effet notable sur le coût, puisque la multiplication de la vitesse est de toute façon nécessaire, le coût de la turbine ne peut qu'augmenter avec sa taille.
5. Enfin, et c'est probablement le point le plus important, le tarif de reprise du kWh sera très certainement revu à la hausse dans un futur proche. Tous les indicateurs actuels vont dans ce sens.

8 Conclusions, remarques et suggestions

La présente étude démontre que la solution optimale correspond à un débit d'équipement de la nouvelle installation de 2.2 m³/s.

En effet, cette solution présente en outre l'avantage de s'intégrer dans l'emprise globale du site.

De plus, l'analyse économique démontre que le prix de revient du kWh est attractif, puisque de 13.0 cts/kWh à comparer à un prix de vente de 15 cts/kWh. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité indique clairement que le projet reste rentable dans la marge d'incertitude des devis estimatifs.

Le projet tel que présenté est une vision réaliste d'un point de vue technique et économique. De ce fait, une gestion précise et efficace de la phase d'exécution, de même que la sélection d'entreprises et fournisseurs de matériel compétents et reconnus diminueront certainement le montant global des investissements.

Dans cette optique, nous conseillons de commander l'ensemble des équipements (turbine, génératrice, armoire de commande, ...) à un seul fournisseur afin d'assurer une parfaite compatibilité entre les divers éléments de l'installation.

9 Suite des travaux

En cas de décision de poursuivre la réalisation de la petite centrale, les étapes suivantes sont à entreprendre:

- Consultation préliminaire des services compétents pour les travaux en cours d'eau pour préavis,
- Mise à l'enquête,
- Elaboration du projet d'exécution, qui précisera notamment, dans le cahier des charges, la méthode d'exécution des travaux et le savoir-faire nécessaire,

- Consultation d'entreprises de génie civil, pour la réalisation des travaux préconisés dans cette étude,
- Consultation restreinte de constructeurs capables de livrer des installations clé en main avec toutes les garanties nécessaires, données selon les normes en vigueur,
- Réalisation et mise en service.

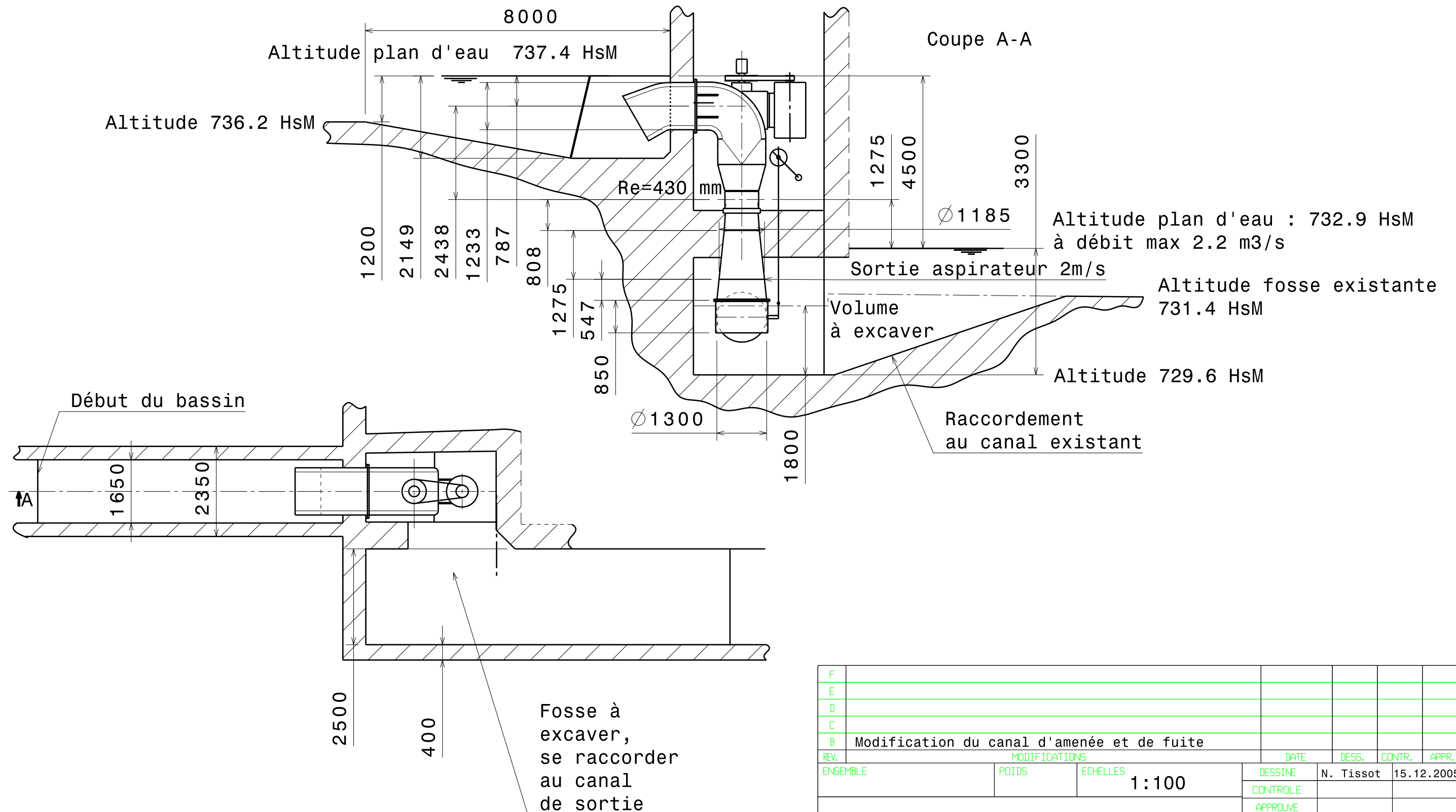
Remarque: l'ensemble de ces travaux pourrait également être confié à une entreprise générale.



Par ailleurs, nous recommandons la réalisation de cahiers des charges clairs et précis, seul moyen d'obtenir des offres comparables de la part des fournisseurs.

10 Annexes

- Annexe A: Plan d'implantation de la petite turbine axiale pour la variante A, pour $Q_N = 2.20 \text{ m}^3/\text{s}$, $H = 4.50 \text{ m}$, $N = 316 \text{ t/min}$
- Annexe B: Plan d'implantation des deux petites turbines axiales pour la variante B, pour $Q_{\text{tot}} = 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$, $H = 4.63 \text{ m}$, $N = 335 \text{ t/min}$
- Annexe C: Détail des coûts du génie civil pour la variante A et la variante B
- Annexe D: Note "Relation entre le rendement énergétique d'une PCH et son coût de construction"
- Annexe E: Schéma de principe pour l'installation des chariots et des rails INP
- Annexe F: Plan de l'aménagement pour la variante A
- Annexe G: Plan de l'aménagement pour la variante B

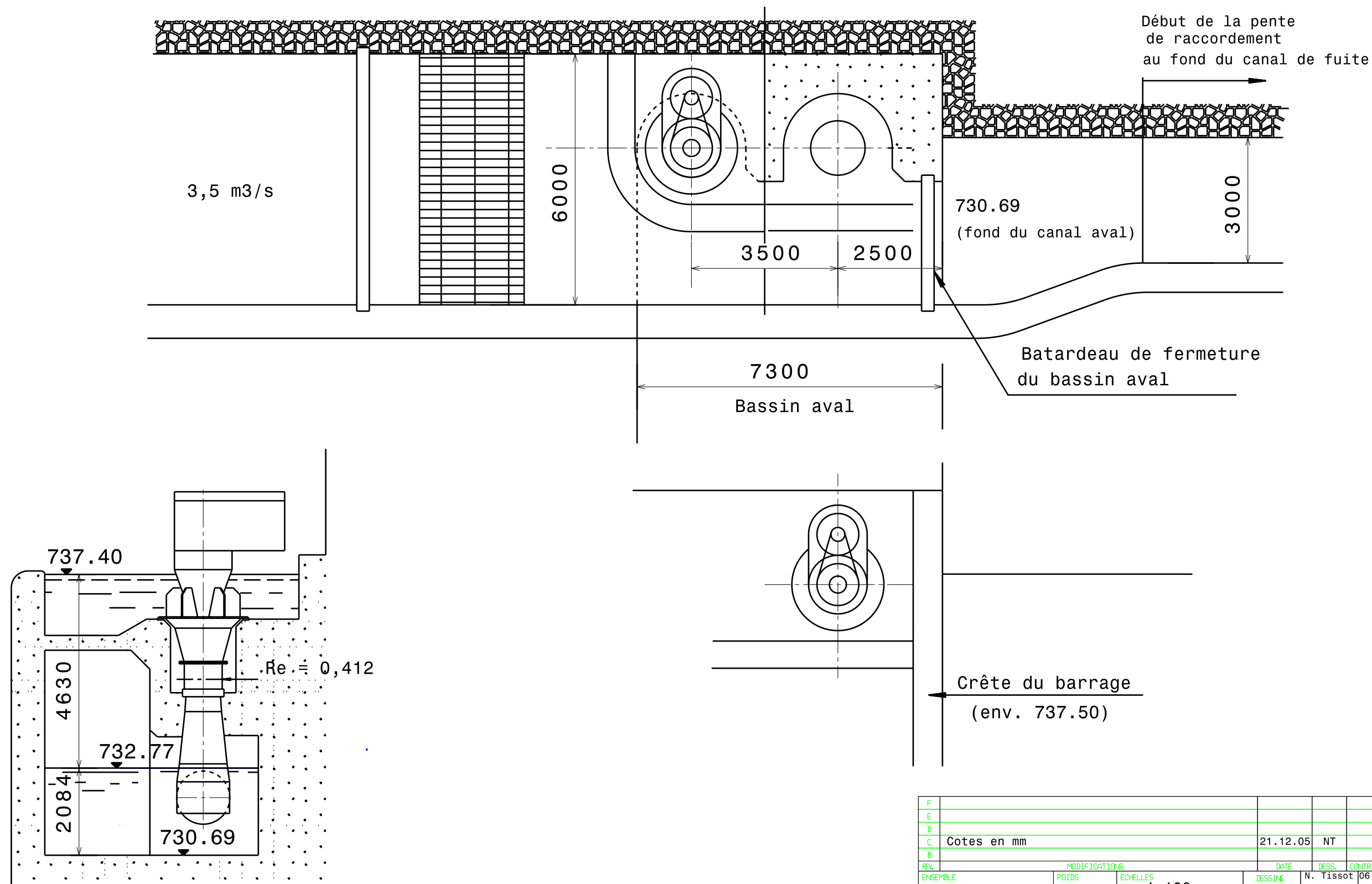
This document is the property of MHyLab and shall not be copied or disclosed to any third party without MHyLab written agreement. Ce document est la propriété de MHyLab et ne doit pas être copié ou transmis à un tiers sans l'accord écrit de MHyLab.


[illegible]

F					
E					
D					
C					
B	Modification du canal d'amenée et de fuite				
REV.	MODIFICATIONS		DATE	DESS.	CONTR. APPR.
ENSEMBLE		POIDS	ECHELLES		1:100
Ma0509 PCH de Noiraigue Variante A Turbine à entrée carrée Qmax=2.2 m3/s			DESSINE	N. Tissot	15.12.2005
			CONTROLE		
			APPROUVE		
					
			Laboratoire de Mini-Hydraulique 1354 MONTCHERAND SUISSE		REV. B
			MP0509-0001-3		B

JEFFREY D. (JEFF) TAUBER-DRAFTING

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.

[illegible]

F							
E							
D							
C	Cotes en mm	21.12.05	NT				
B							
REV.	MODIFICATIONS		DATE	DESS.	CONTR.	APPR.	
ENSEMBLE	POIDS	ECHELLES 1:100	DESSINE	N. Tissot	06.12.2005		
Ma0509 PCH de Noiraigue Variante B 2 turbines à chambre d'eau Q max = 3.5 m³/s			CONTROLE				
			APPROUVE				
 Laboratoire de Mini-Hydraulique 1354 MONTCHERAND SUISSE			MA0509-0002-2			REV.	
						C	

Ma0509- Noiraigue

Devis des travaux de génie civil

Etablis par RWB

déc.05

	Variante A (2.2 m3/s)				sous- total II	Variante B (3.5 m3/s)				sous- total II
	U	métré	PU	total		U	métré	PU	total	
Chambre de captage				48'090	67'000				64'090	84'000
travaux préparatoires										
batardeau	m	10	500	5'000		m		10	500	5'000
nouveau lit										
22x5.0 =110 m2 x ép 50 cm = 55 m3										
fouille	m3	55	100	5'500		m3	55	100	5'500	
béton lit ép 20	m3	22	600	13'200		m3	22	600	13'200	
façon de lit	m2	110	15	1'650		m2	110	15	1'650	
nouveau mur béton										
long 18 m x ép 40 cm x haut 130 cm = 10.0 m3										
batardeau	gl	0	1'000	0		gl	0	1'000	0	
préparation surface	m2	0	100	0		m2	0	100	0	
coffrage	m2	48	80	3'840		m2	48	80	3'840	
béton	m3	10	600	6'000		m3	10	600	6'000	
armature	kg	1000	4	4'000		kg	1000	4	4'000	
arasée	m	18	50	900		m	18	50	900	
vanneatardeau	p	1	8'000	8'000		p	3	8'000	24'000	
Canal supérieur				70'000	98'000				120'400	166'000
démolition ancien mur	gl	1	3'000	3'000		gl	1	3'000	3'000	
démolition divers	gl	1	2'000	2'000		gl	1	2'000	2'000	
terrassement	m3	18	300	5'400		m3	36	300	10'800	
béton sous œuvre	gl	1	4'000	4'000		gl	0	4'000	0	
Fondations béton	m3	9	1'200	10'800		m3	20	1'200	24'000	
U béton	m3	25	1'200	30'000		m3	60	1'200	72'000	
évacuation - égalisation	m3	18	100	1'800		m3	36	100	3'600	
vanneatardeau	p	1	8'000	8'000		p	1	0	0	
prise d'eau fontaines	gl	1	5'000	5'000		gl	1	5'000	5'000	
Canal inférieur				54'500	76'000				60'000	84'000
agrandissement sortie										
long 11 m x larg 1,2 x prof 1.5										
démo ancien mur	m3	5	500	2'500		m3	5	500	2'500	
terrassement divers	gl	0	2'000	0		m3	30	150	4'500	
terrassement ext	m3	44	500	22'000		m3	44	500	22'000	
terrassement sous oeuvre	m3	13	1'200	15'600		m3	13	1'200	15'600	
béton	m3	0	30	0		m3	10	100	1'000	
remblayage	m3	0	30	0						
Curage du lit										
long 30 m x larg 2.65 = 80 m2										
Curage du lit	m2	80	50	4'000		m2	80	50	4'000	
vanneatardeau	p	1	8'000	8'000		p	1	8'000	8'000	
réglage du fond	m2	80	30	2'400		m2	80	30	2'400	
Turbines				37'500	53'000				141'500	194'000
long 11 m x larg 1,2 x prof 1.5										
démo ancien mur	m3	0	100	0		m3	0	100	0	
démolitions divers	gl	0	2'000	0		gl	0	2'000	0	
terrassement 3.5x2.5x2.5	m3	22	500	11'000		m3	180	100	18'000	
sous-œuvre y c fouille	m3	15	1'500	22'500		m3	30	1'300	39'000	
remblayage	m3	0	1'500	0		m3	0	1'500	0	
pv rocher	p	0	5'000	0		m3	90	100	9'000	
dalle appui turbine	m3	4	1'000	4'000		m3	100	300	30'000	
murs ext béton						m3	35	1'000	35'000	
fond béton						m3	15	700	10'500	
Sous-total I				210'090					385'990	
inst chantier	%		8.0%	16'807		%		8.0%	30'879	
Divers et imprévus	%		15.0%	31'514		%		15.0%	57'899	
Honoraires	%		17.0%	35'715		%		14.0%	54'039	
Sous-total II				294'126	294'000				528'806	528'000
TVA			7.6%	22'354				7.6%	40'189	
TOTAL GENERAL				316'480					568'996	

ne sont pas compris:

évacuation des blocs à la décharge
palan intérieur
couverture du canal supérieur

Relation entre le rendement énergétique d'une PCH et son coût de construction

Le rendement énergétique des différents équipements d'une PCH est une notion qui paraît parfois quelque peu abstraite au regard des exploitants. Le but de cet article est de montrer l'importance financière du rendement et, singulièrement, de celui des turbines qui équipent ces installations.

1. Rendement global ξ d'une PCH – Rappel

ξ (ksi) est le rendement global de l'installation. C'est le produit des rendements de la conduite forcée η_C (η_{taC}), de la turbine η_T , du système éventuel de multiplication de la vitesse η_M , du générateur électrique η_G et du transformateur éventuel η_{Tr} . C'est une variable en fonction du débit turbiné Q .

$$\xi = \eta_C \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tr} = f(Q) \quad [-]$$

On considère ξ au débit maximal de l'installation.

Le rendement η_C de la conduite forcée résulte uniquement du choix économique de son diamètre. Sauf cas exceptionnel (conduite très longue, par exemple), ce choix conduit à une valeur élevée de η_C . Typiquement, $\eta_C \approx 95 \%$.

Le rendement η_T de la turbine pose le problème principal d'une PCH. Il sera explicité plus loin.

Le rendement mécanique η_M concerne la multiplication éventuelle de la vitesse de rotation de la turbine lorsque cette vitesse est très faible (aménagements à basse chute). On évitera le multiplicateur mécanique (coût élevé, mauvais rendement, fonctionnement bruyant, frais d'entretien importants). On privilégiera autant que possible l'accouplement direct avec un alternateur à grand nombre de pôles ou alors un système à multiplication électronique de fréquence. Pour les faibles puissances, un entraînement par poulies et courroie peut apporter une solution avantageuse. Dans tous les cas, on attachera une grande importance au rendement du système eu égard à son coût, comme on le verra plus loin.

Le rendement η_G du générateur électrique est généralement élevé, entre 93 et 96 %. De plus, il est facilement vérifiable sur le banc d'essai du constructeur. C'est bien d'ailleurs la raison pour laquelle les valeurs garanties de ces machines sont effectivement atteintes.

Le rendement η_{Tr} du transformateur, lorsque celui-ci est nécessaire, est très élevé : 97 à 98 %. Comme pour l'alternateur, le rendement du transformateur est facilement vérifiable en usine.

En admettant que l'installation ne comporte pas de multiplicateur de vitesse, le rendement global peut s'écrire :

$$\xi = \eta_C \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tr} = 0,95 \cdot \eta_T \cdot 0,95 \cdot 0,97 = 0,875 \cdot \eta_T \quad [-]$$

2. Rendement η_T de la turbine

Le rendement η_T d'une turbine hydraulique en fonction de son débit dépend de son type et de sa vitesse spécifique. La hauteur de chute nette étant le paramètre caractérisant principal.

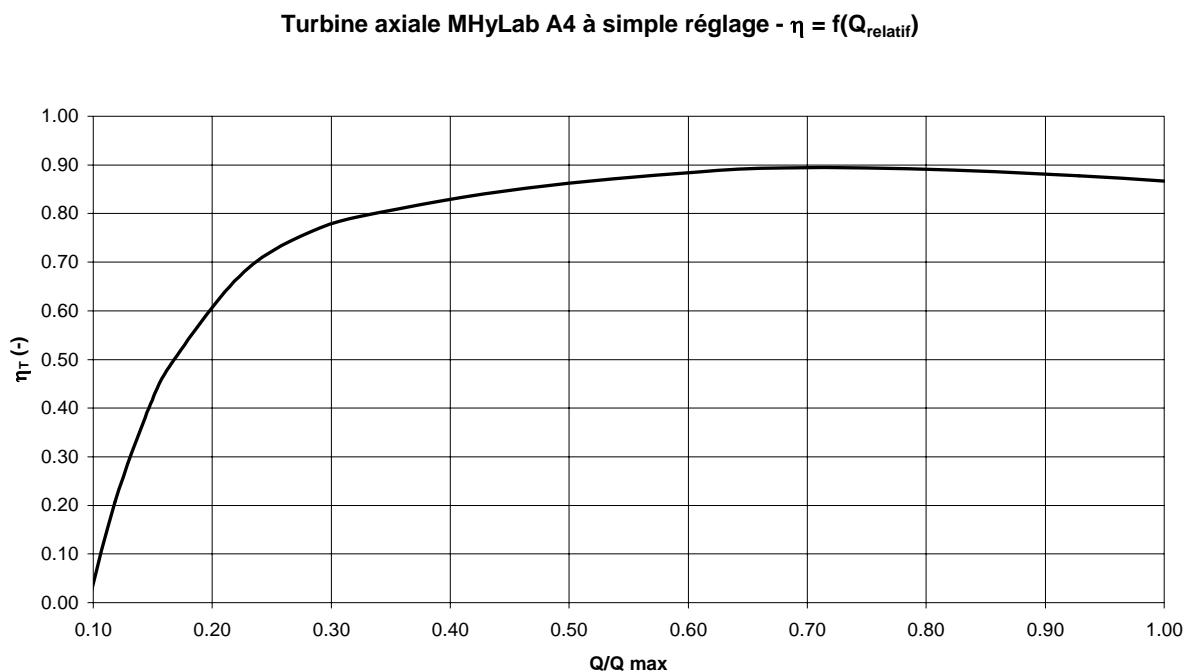
Le rendement ainsi que les autres caractéristiques importantes des turbines, sont toujours le résultat d'une recherche longue et coûteuse. La connaissance dans ce domaine se situe dans les laboratoires des fournisseurs de grandes turbines. Elle n'est pas disponible pour des raisons commerciales évidentes.

Les constructeurs indépendants de petites turbines ne disposent pas des moyens qui permettraient de financer une recherche individuelle théorique et expérimentale.

MHyLab, Laboratoire de mini-hydraulique de Montcherand, est né de cette problématique. La technique développée dans son laboratoire s'appuie aussi bien sur l'expérience de la construction des grandes machines que sur les méthodes d'analyse des écoulements les plus récentes.

Dans l'évaluation de la rentabilité d'une PCH, le rendement η_T admis de la turbine en fonction de son débit Q doit donc nécessairement provenir d'une source garantie par des essais en laboratoire.

Exemple de courbe de rendement d'une turbine axiale (basse chute) optimisée en laboratoire.



On observera, sur le graphique ci-dessus, qu'à 15 % du débit nominal de la turbine, le rendement est encore de 40 % !

3. Prix de vente " r_v " du kWh produit par une petite centrale hydraulique

$$r_v = \frac{a \cdot C + e + m}{E} \quad \text{①} \quad [\text{CHF/kWh}]$$

avec :

- a = taux annuel d'annuité fixe [an⁻¹]
- C = capital investi [CHF]
- e = charge d'exploitation [CHF]
- m = marge (bénéfice+réserve) [CHF]
- E = production électrique annuelle nette. [kWh/an]

En général, " r_v " est fixé par des conditions cadre.

En Suisse, pour les PCH :

$$r_v = 0,15 \quad (\text{actuellement}) \quad [\text{CHF/kWh}]$$

La marge « m » résulte d'un choix de l'exploitant, en fonction du risque financier qu'il a accepté de prendre. Dans un proche avenir, elle pourrait aussi être prescrite par une disposition légale (rétribution au juste prix du kWh produit par une source renouvelable).

$$a = \boxed{} \quad [an^{-1}]$$

On admet $R = 0,05$ (5,0 %) ; N est variable suivant la catégorie d'investissement :

(1) :	Proportion (%) de l'investissement global, y compris la part correspondante des études générales, de la planification, etc. ...	[%]
(2) :	Durée N de l'amortissement.	[an]
(3):	Coefficient d'annuité "a" pour chaque partie de l'investissement.	[an ⁻¹]
	Moyenne pondérée de "a" = 0,0723	[an ⁻¹]

On admet que les rendements de tous les équipements de l'installation, à l'exception de celui de la turbine, ont été optimisés. Les développements suivants ne concernent donc que le gain de rendement sur la turbine.

- η_{TS} = rendement standard de la turbine à pleine charge,
non optimisée en laboratoire. [-]
- η_{TL} = rendement de la turbine à pleine charge issu de la recherche en laboratoire. [-]
- E_1 = production annuelle de l'installation obtenue avec une
turbine "standard". [kWh/an]
- E_2 = production annuelle obtenue avec une turbine optimisée.
- C_1 = Capital initial maximal pouvant être investi sur la base du rendement
standard de la turbine. [CHF]
- C_2 = Capital initial pouvant être investi si l'installation est équipée d'une
turbine optimisée. [CHF]

On calcule :

$$E_2 = E_1 \cdot \frac{\eta_{TL}}{\eta_{TS}} \quad [\text{kWh/an}]$$

$$E_2 - E_1 = E_1 \cdot \left(\frac{\eta_{TL}}{\eta_{TS}} - 1 \right) \quad [\text{kWh/an}]$$

En admettant que les termes "m" et "e" de l'équation ① sont identiques dans les deux cas de figure, on peut écrire :

$$C_2 - C_1 = \Delta C = \frac{r_v \cdot (E_2 - E_1)}{a} = \frac{r_v}{a} \cdot \left(\frac{\eta_{TL}}{\eta_{TS}} - 1 \right) \cdot E_1 \quad [\text{CHF}]$$

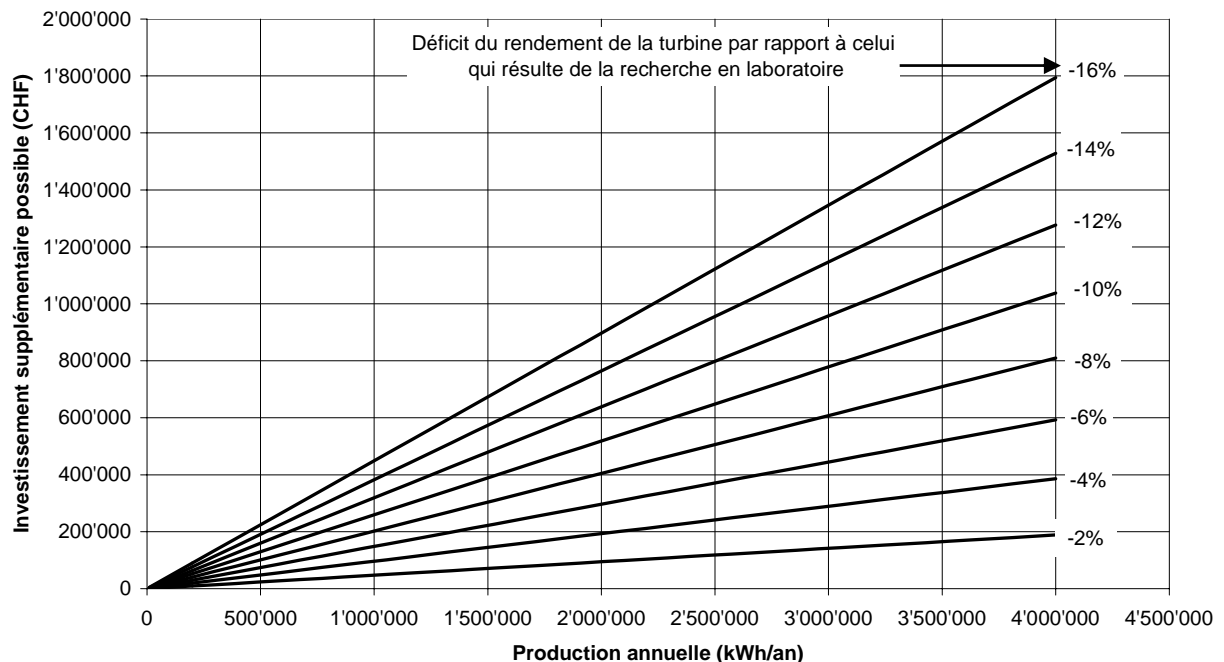
$$= \frac{0,15}{0,0723} \cdot \left(\frac{\eta_{TL}}{\eta_{TS}} - 1 \right) \cdot E_1 = 2,075 \cdot \left(\frac{\eta_{TL}}{\eta_{TS}} - 1 \right) \cdot E_1 \quad [\text{CHF}]$$

Connaissant la production E_1 , calculée avec le rendement standard η_{TS} et en admettant $\eta_{TL} = 0,90$, on calcule le montant supplémentaire ΔC qu'il aurait été possible d'investir dans l'installation, en obtenant le même produit financier annuel.

Par exemple, si $\eta_{TS} = 0,89$ (seulement 1 point inférieur à η_{TL}) et si $E_1 = 1'000'000$ kWh :

$$\Delta C = 2,075 \cdot \left(\frac{0,90}{0,89} - 1 \right) \cdot 1'000'000 = 23'314,-- \quad [\text{CHF}]$$

Relation entre le rendement de la turbine et l'investissement initial



Remarques :

Il n'est pas prouvé que la turbine issue de la recherche en laboratoire soit plus chère qu'une turbine dite « standard ». Il est, de plus, probable que les charges d'exploitation soient plus réduites en raison de l'application de techniques réputées plus fiables.

D'autre part, les écarts des rendements entre ceux des turbines « standard » et ceux qui sont garantis sur la base d'essais en laboratoire, sont généralement très importants. Il est fréquent d'observer des valeurs inférieures à 80 %, voire même à 70 %.

6. En conclusion

Lorsqu'il évalue la faisabilité financière de son projet, le promoteur d'une petite centrale doit nécessairement prendre en compte le rendement global ξ de l'aménagement en fonction du débit turbiné. Comme on l'a vu, la rentabilité de l'installation et le montant qu'il est possible d'investir pour sa réalisation en dépendent fortement.

Pour chacun des équipements de l'installation impliqués dans le rendement global (conduite forcée, vannes, turbine, multiplicateur de vitesse, générateur, transformateur), le maître d'œuvre obtiendra des fournisseurs :

- ✧ La courbe des rendements garantis en fonction du débit.
- ✧ La preuve de ces garanties (calculs, origine, certificats, etc.).
- ✧ L'acceptation de pénalités, voire de refus du matériel, en cas de non respect des garanties.

On évitera ainsi de graves déconvenues au moment de la mise en service de l'installation, dont l'histoire, même très récente, des petites centrales hydrauliques est, hélas, riche d'exemples.

Raymond CHENAL, juin 2005

[illegible]

CENTRALE DE TURBINAGE

Michéal ZAECH
Moulin 9
2103 Noiraigue

1 turbine
max = 2.2m³/s
H = 4.50m

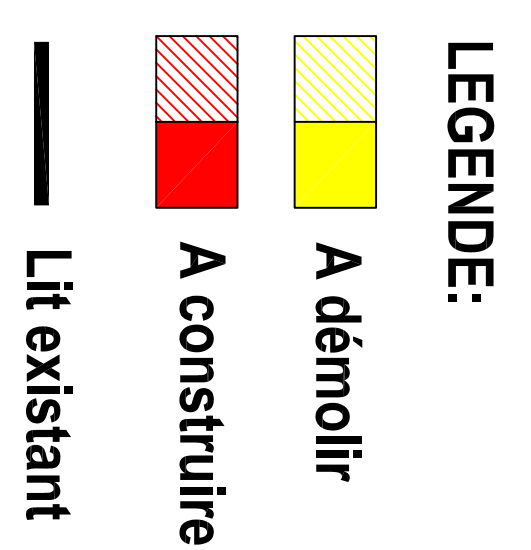


**SITUATION
PROFIL EN LC
COUPES**

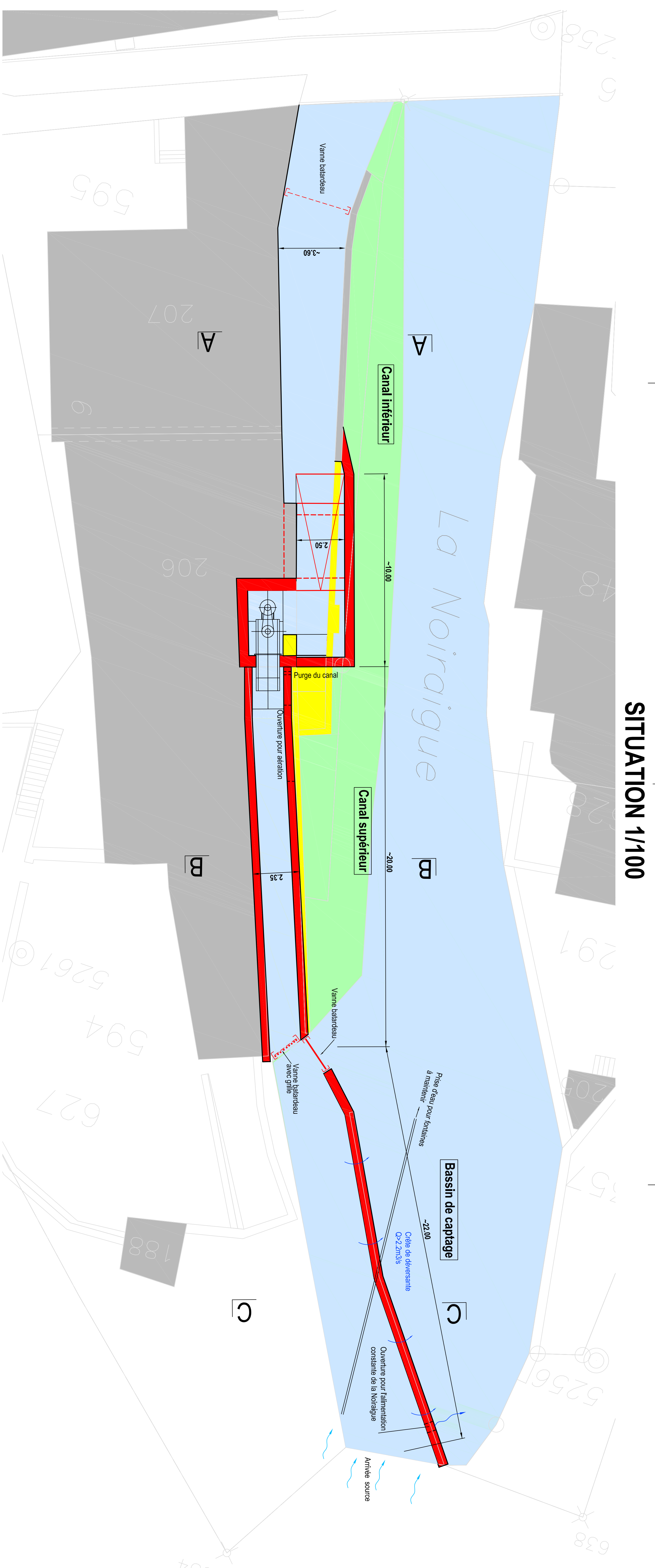
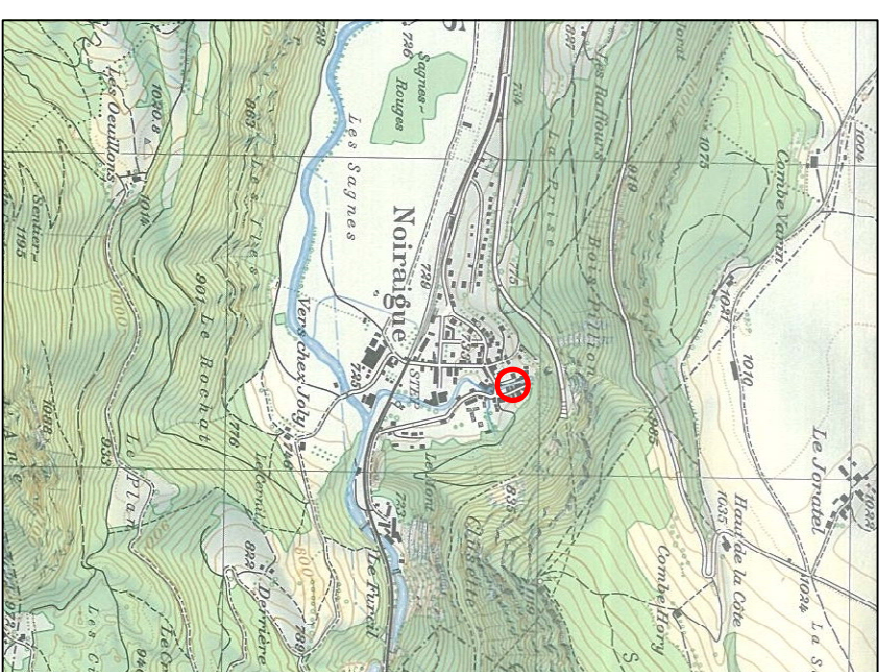
Due to the presence of
CH-2053 Center N1

Tel. +41 0312 604 20 60
Fax. +41 0312 603 56 60
e-mail : connect@nubi.ch
web : www.nubi.ch

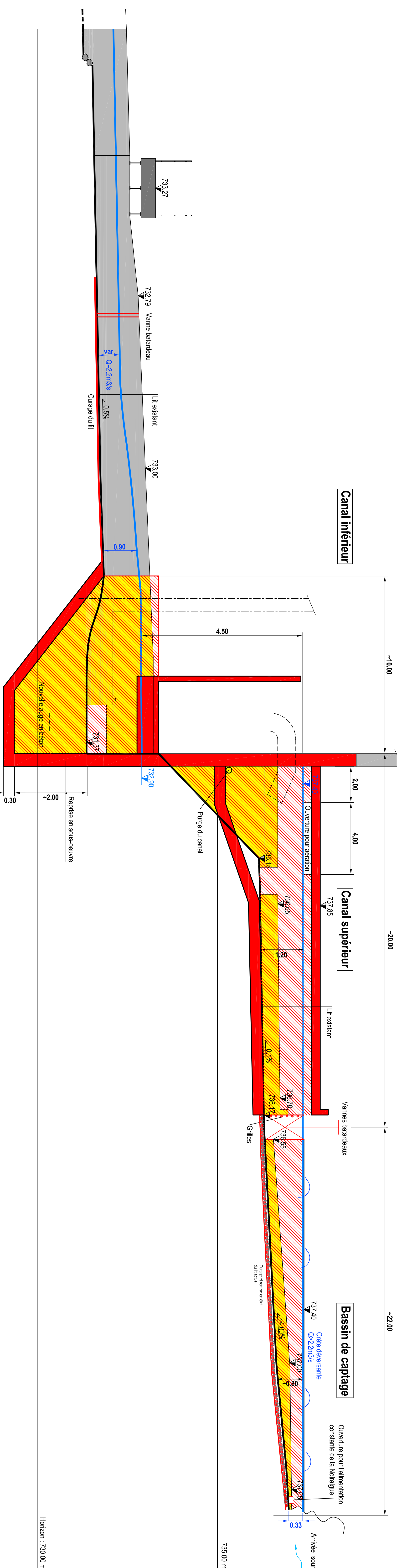
Temperature	α (°C)
147.5	75



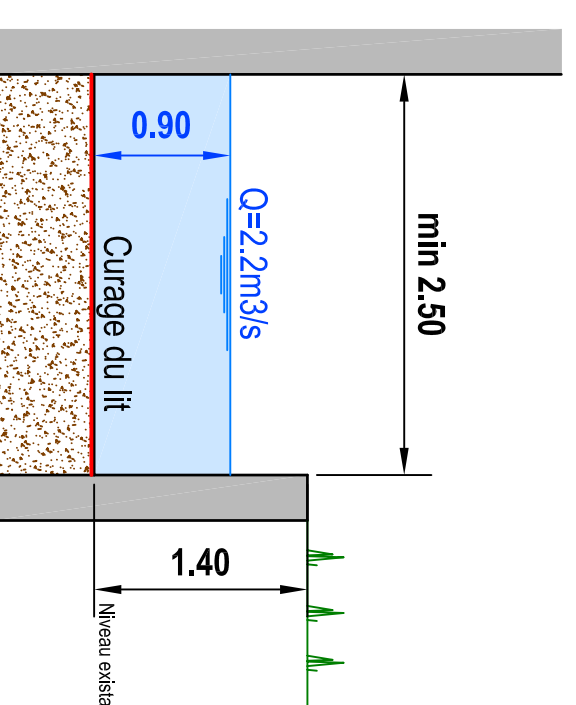
Situation 1/25'00C



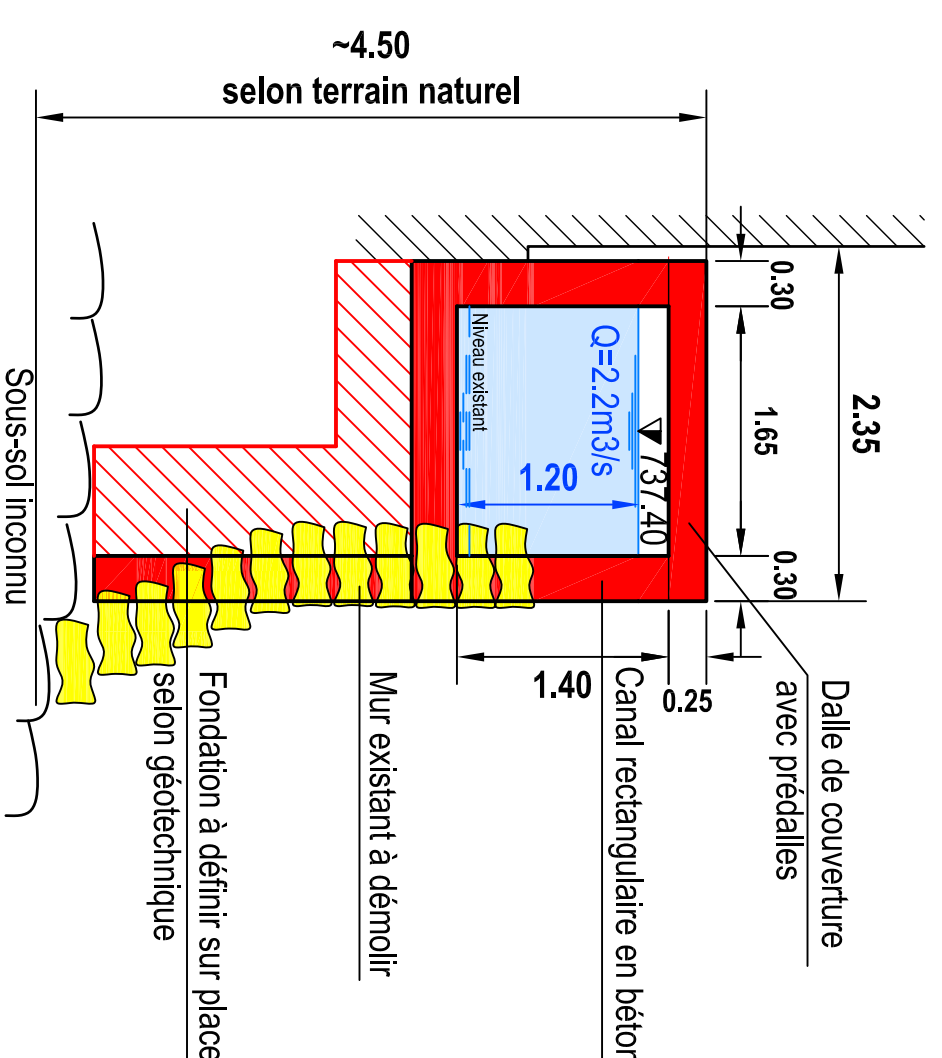
SITUATION 1/100

PROFIL EN LONG 1/100-50

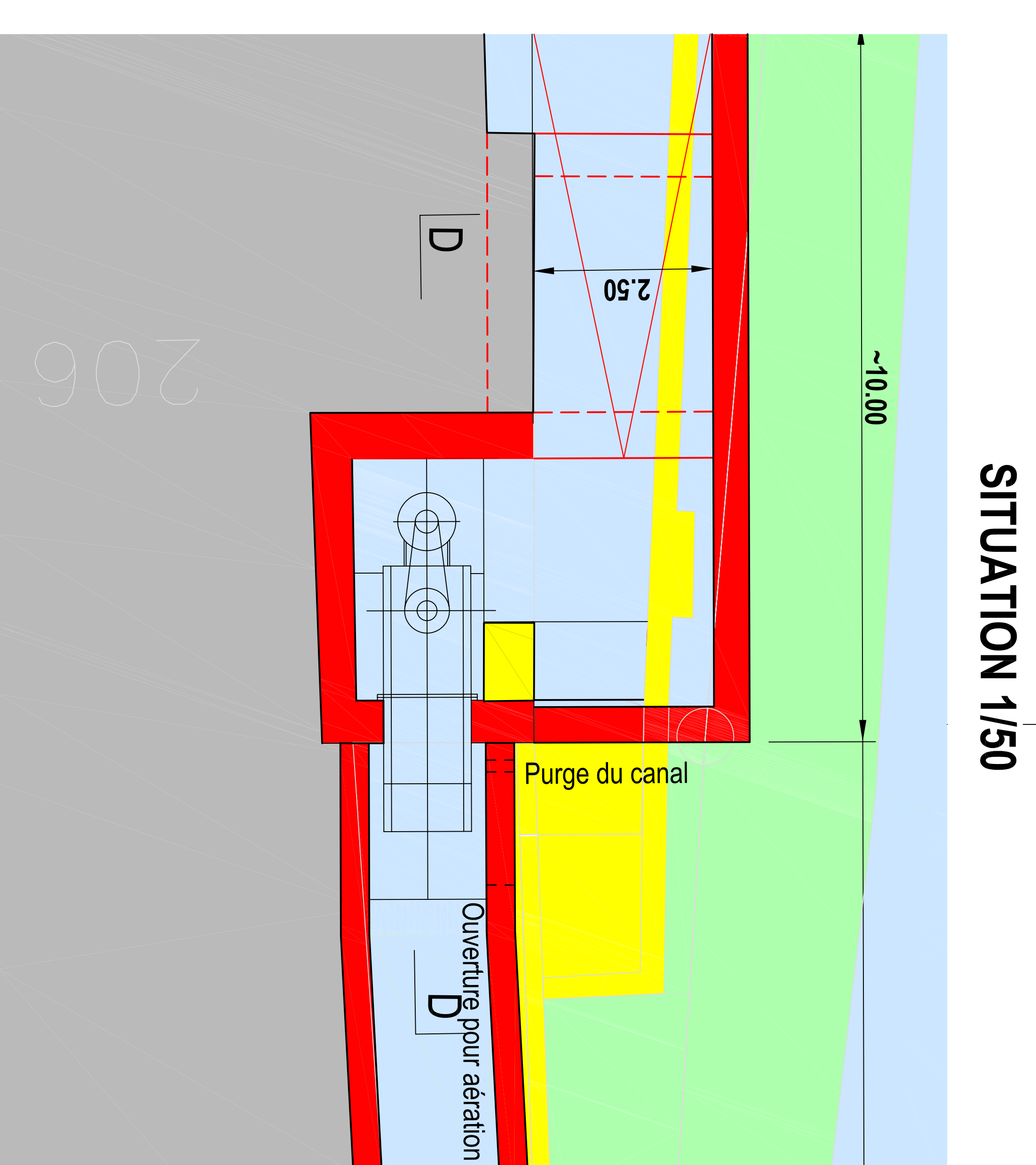
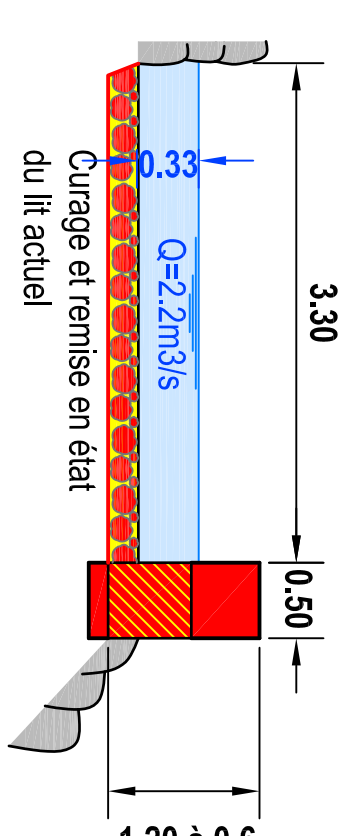
COUPE A-A 1/50



COUPE B-B 1/50



COUPE C-C 1/50



SITUATION 1/50

COUPE D-D 1/50

