



ANNEXE E
ETUDE DE STABILITE DU BARRAGE
– SANS REHAUSSE



Barrage de La Lauch

Mission de Maîtrise d'œuvre du confortement du barrage

CALCULS DE STABILITE – SOLUTION SANS REHAUSSE

Procédure n°21000314



Barrage de La Lauch
Mission de Maîtrise d'œuvre du confortement du barrage
Communauté Européenne d'Alsace
Calculs de stabilité – Solution sans réhausse

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI PAR	APPROUVÉ PAR	DATE
A	Première émission	C. MASSON / J.R. LHERBIER	G. DAUTOIS	09/09/22

Barrage, Hydroélectricité et Infrastructures
6, rue de Lorraine 38130 ECHIROLLES – TEL 04 76 33 40 00

ARTELIA SAS
16 Rue Simone Veil – 93400 Saint-Ouen-sur-Seine

Calculs de stabilité – Solution sans réhausse
BARRAGE DE LA LAUCH

SOMMAIRE

1.	CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	4
2.	RÉFÉRENCES – GUIDES DE CALCUL	5
3.	HYPOTHÈSES DE CALCUL	6
3.1.	Niveaux d'eau	6
3.2.	Profils de calcul	6
3.2.1.	Barrage en phase travaux (profil 1)	6
3.2.2.	Barrage après travaux (profil 2)	7
3.2.3.	Evacuateur de crue à seuil libre en phase travaux (profil 3)	8
3.2.4.	Evacuateur de crue à seuil libre après travaux (profil 4)	8
3.3.	Caractéristiques des matériaux	9
3.3.1.	Poids volumiques des matériaux	9
3.3.2.	Paramètres de résistance à l'interface ouvrage / fondation	9
3.4.	Actions	10
3.4.1.	Actions statiques	10
3.4.2.	Actions dynamiques	11
4.	MÉTHODOLOGIE	13
4.1.	Logiciel de calcul.....	13
4.2.	Situations de projet	13
4.3.	Etats-limites et critères de stabilité	13
4.3.1.	Etat limite d'extension des fissures.....	14
4.3.2.	Etat limite de résistance à l'effort tranchant	14
4.3.3.	Etat limite de flottaison	14
4.3.4.	Critères de stabilité	15
5.	RÉSULTATS.....	16
5.1.	Barrage.....	16
5.1.1.	Barrage en phase travaux (profil 1).....	16
5.1.2.	Barrage après travaux (profil 2)	17
5.2.	Evacuateur de crues	18
5.2.1.	Evacuateur de crues en phase travaux (profil 3)	18
5.2.2.	Evacuateur de crues après travaux (profil 4)	19

TABLEAUX

Tableau 1- Niveaux d'eau	6
Tableau 2- Situations de projet étudiées.....	13
Tableau 3- Critères d'ouverture des fissures	15
Tableau 4- Valeurs des coefficients partiels et globaux pour les calculs de stabilité.....	15
Tableau 5- Critères d'état limite de flottaison	15
Tableau 6- Barrage en phase travaux (profil 1) – Synthèse des actions.....	16
Tableau 7- Barrage en phase travaux (profil 1) – Vérifications des critères de stabilité	16
Tableau 8- Barrage après travaux (profil 2) – Synthèse des actions	17
Tableau 9- Barrage après travaux (profil 2) – Vérifications des critères de stabilité	18
Tableau 10- Evacuateur de crue en phase travaux (profil 3) – Synthèse des actions.....	18
Tableau 11- Evacuateur de crue en phase travaux (profil 3) – Vérifications des critères de stabilité	18
Tableau 12- Evacuateur de crue après travaux (profil 4) – Synthèse des actions	19
Tableau 13- Barrage après travaux (profil 2) – Vérifications des critères de stabilité	20

FIGURES

Figure 1- Profil de calcul – Barrage en phase travaux.....	7
Figure 2- Profil de calcul – Barrage après travaux	7
Figure 3- Profil de calcul – Evacuateur de crues en phase travaux	8
Figure 4- Profil de calcul – Evacuateur de crues après travaux	9
Figure 5- Exemple de profil de sous-pression prenant en compte le dispositif de drainage (Profil de calcul du barrage après travaux – Situation de Retenue Normale)	10
Figure 6- Exemple de profil de sous-pression en l'absence de dispositif de drainage (Profil de calcul du barrage en phase travaux – Situation de crue de chantier).....	11

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La présente note de calcul concerne la vérification de la stabilité du barrage de La Lauch pendant les travaux de confortement et après confortement, dans le cas où celui-ci ne serait pas réhaussé. Cette note constitue une annexe du rapport d'Avant-Projet Sommaire.

La stabilité du barrage est vérifiée au niveau de la coupe de plus grande hauteur ainsi qu'au niveau de l'évacuateur de crue à seuil libre.

2. REFERENCES – GUIDES DE CALCUL

- « Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages »
- Comité Français des Barrages et Réservoirs, «Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids,» Octobre 2012.

3. HYPOTHESES DE CALCUL

3.1. NIVEAUX D'EAU

Tableau 1- Niveaux d'eau

Situation	Amont	Aval
RN	940,00 m	914,00 m
PHE	941,10 m	921,66 m
Crue de chantier - Q100	938,40 m	914,00 m
Cote de danger	942,00	921,66 m

Par défaut, la cote de dangers est limitée à la crête de l'ouvrage. En effet, en l'absence d'étude spécifique permettant d'attester de la capacité du barrage à surverser et de l'absence de risque d'érosion par surverse au niveau du pied aval, la stabilité de l'ouvrage ne saurait être garantie pour une cote de retenue supérieure.

En l'absence de calculs hydrauliques pour le débit de crue correspondant à un niveau de réservoir à la cote de danger, le niveau aval de 921,66 m NGF est considéré par défaut dans cette étude. Cependant, une étude de sensibilité a été réalisée sur celui-ci montrant qu'il a relativement peu d'influence sur les résultats de l'étude de stabilité.

3.2. PROFILS DE CALCUL

D'après les informations disponibles, la hauteur maximale du barrage sur fondation est de 28 m. La crête de l'ouvrage étant aux environs de la cote 942 m NGF, l'interface entre le barrage et la fondation est donc supposée être à la cote 914 m NGF.

Cette altitude du contact barrage / fondation n'a pas été retrouvée dans les diverses investigations. En effet, l'interface a généralement été repérée aux environs de 915 à 916 m NGF. Toutefois, dans une approche conservative, l'interface entre le barrage et la fondation est supposée horizontale et située à l'élévation 914 m NGF pour l'ensemble des coupes de calcul considérées ci-après.

3.2.1. Barrage en phase travaux (profil 1)

Pendant la phase de travaux, la situation la plus critique pour la stabilité du barrage correspond au moment où la recharge existante en remblai est supprimée et où la construction de la recharge aval en BCR n'a pas encore débuté. La coupe de calcul du barrage non-déversant correspondant à cette phase des travaux est présenté sur la figure ci-dessous. Ce profil est nommé « profil 1 » dans la suite de la note.

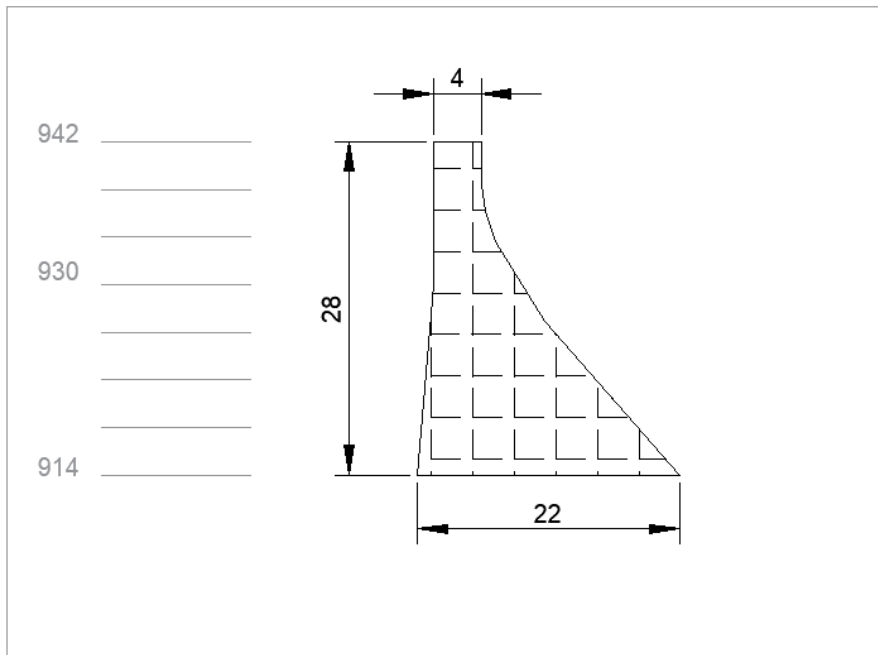


Figure 1- Profil de calcul – Barrage en phase travaux

3.2.2. Barrage après travaux (profil 2)

La géométrie suivante est considérée pour la section du barrage non-déversante après travaux de confortement. Ce profil est nommé « profil 2 » dans la suite de la note.

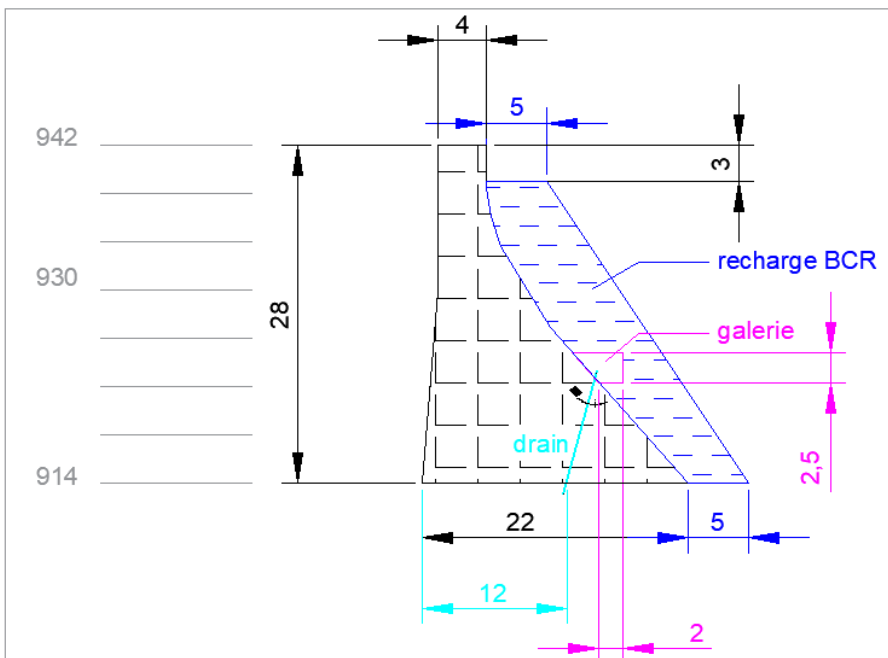


Figure 2- Profil de calcul – Barrage après travaux

3.2.3. Evacuateur de crue à seuil libre en phase travaux (profil 3)

Le profil ci-dessous correspond à la section déversante du barrage la plus critique vis-à-vis de la stabilité de l'évacuateur de crue en phase travaux. Similairement au profil 1, il est considéré que la recharge en BCR n'est pas encore construite.

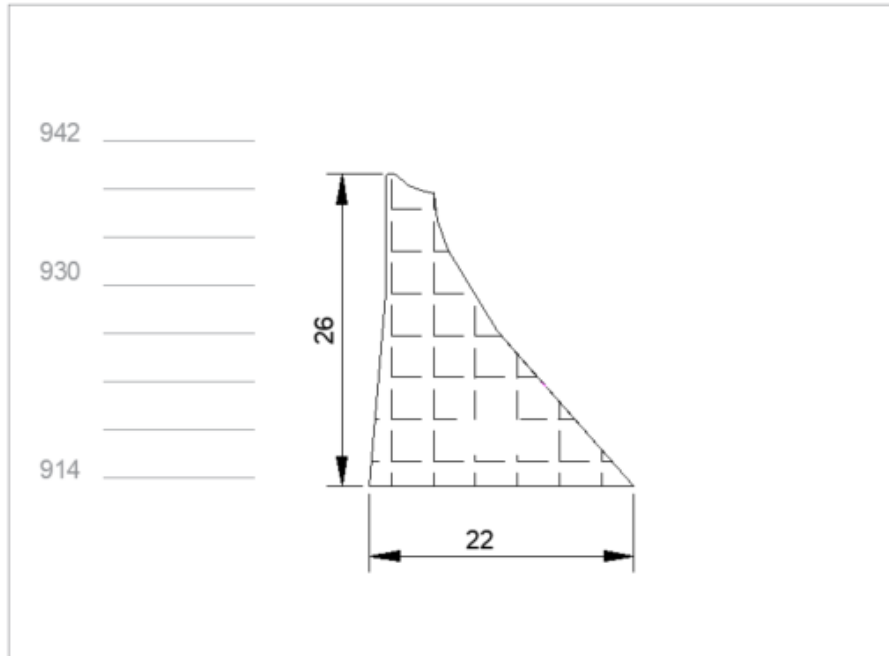


Figure 3- Profil de calcul – Evacuateur de crues en phase travaux

3.2.4. Evacuateur de crue à seuil libre après travaux (profil 4)

La géométrie suivante est considérée au niveau de l'évacuateur de crue à seuil libre après travaux de confortement. Ce profil est nommé « profil 3 » dans la suite de la note.

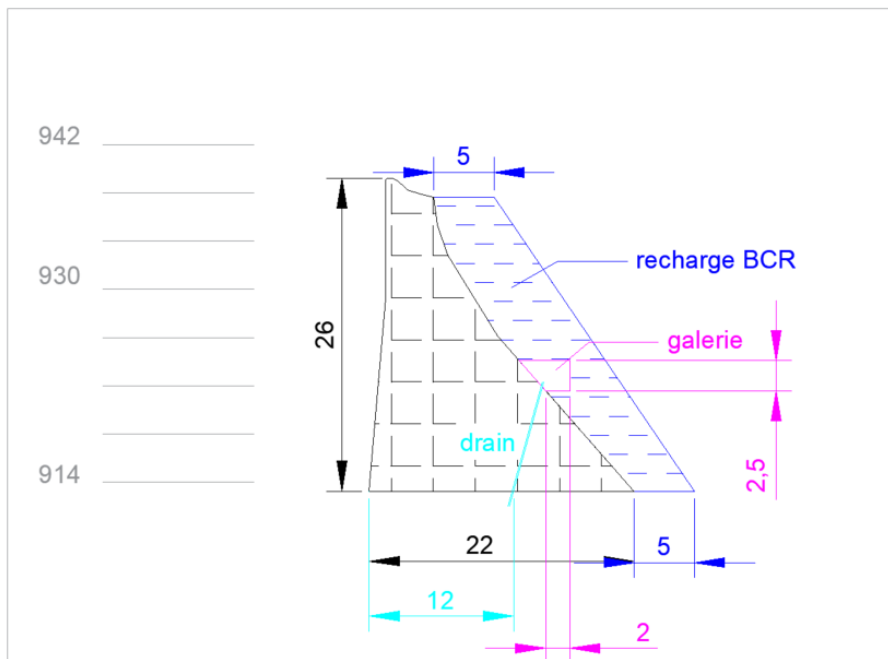


Figure 4- Profil de calcul – Evacuateur de crues après travaux

3.3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

3.3.1. Poids volumiques des matériaux

Les poids volumiques suivant sont considérés dans la suite des calculs :

- Maçonnerie : $\gamma_m = 24 \text{ kN/m}^3$;
- BCR : $\gamma_b = 24 \text{ kN/m}^3$;
- Eau : $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$.

3.3.2. Paramètres de résistance à l'interface ouvrage / fondation

L'ensemble des ouvrages sont supposés fondés au rocher. Les caractéristiques mécaniques suivantes sont prises en compte dans les calculs :

- $\varphi_k = 41^\circ$, l'angle de frottement à l'interface ouvrage / fondation ;
- $c_k = 0 \text{ kPa}$, la cohésion à l'interface ouvrage / fondation ;
- $f_{tk} = 0 \text{ kPa}$, la résistance à la traction à l'interface ouvrage / fondation.

3.4. ACTIONS

3.4.1. Actions statiques

Ces actions statiques suivantes concernent toutes les situations de projet :

- Le poids-propre des ouvrages (avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$) ;
 - La poussée hydrostatique amont ;
 - La poussée hydrostatique aval ;
 - Les sous-pressions appliquées au contact ouvrage / fondation.
- Le cas échéant (profils après travaux), les dispositifs de drainage de la fondation des ouvrages étudiés sont considérés dans les calculs. Le coefficient de rabattement pris en compte pour réduire le diagramme des sous-pressions est de 0,5. Le rabattement des sous-pressions est calculé suivant les recommandations du CFBR et illustré sur la Figure 5.

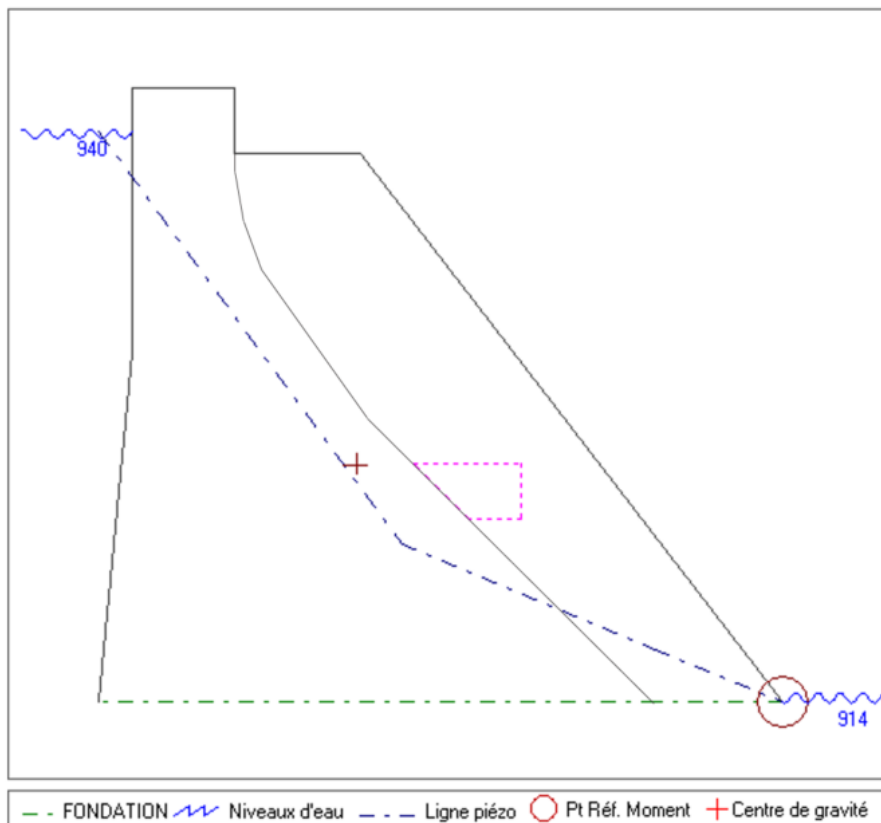


Figure 5- Exemple de profil de sous-pression prenant en compte le dispositif de drainage (Profil de calcul du barrage après travaux – Situation de Retenue Normale)

- En l'absence de drainage (profils en phase travaux), un diagramme de sous-pression linéaire entre le niveau amont et le niveau aval est considéré, comme illustré sur la figure ci-dessous.

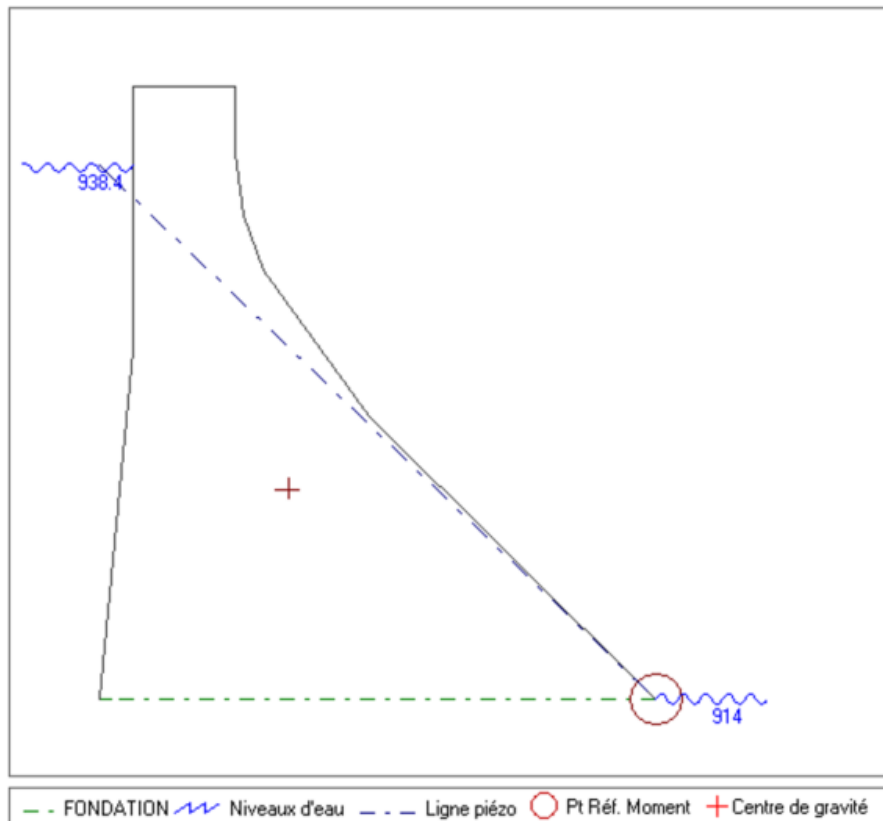


Figure 6- Exemple de profil de sous-pression en l'absence de dispositif de drainage (Profil de calcul du barrage en phase travaux – Situation de crue de chantier)

En l'attente de données bathymétrique, la poussée des sédiments sur le parement amont est négligée.

3.4.2. Actions dynamiques

Ces actions s'appliquent uniquement à la situation accidentelle sismique.

Les calculs sont effectués à l'aide d'une méthode pseudo-statique. Les sollicitations sismiques sont donc appliquées de manière simplifiée en tant qu'actions statiques individuelles jugées représentatives.

En cas de situation accidentelle sismique les actions additionnelles ci-dessous sont considérées :

- La force d'inertie issue de l'accélération de la masse de chaque coupe-type par le séisme. Cette force d'inertie s'applique au centre de gravité de la coupe-type. Son intensité est donnée par :

$$F = k V \gamma_b \text{ avec } k = \alpha \frac{a_g}{g} \text{ où :}$$

- k est le coefficient pseudo-statique adimensionnel ;
 - α est le coefficient sismique adimensionnel pris égal à 2/3 pour la composante horizontale et 0,20 pour la composante verticale ;
 - a_g est l'accélération maximale au sol ;
 - V est le volume du corps rigide ;
 - γ_b est le poids volumique du matériau.
- La surpression hydrodynamique calculée selon la méthode de Westergaard. Cette force est appliquée sur le parement amont du barrage en un point situé au 2/5 de la hauteur en partant du bas. Son intensité vaut :

$$F = \frac{7}{12} k \gamma_w h^2 \text{ avec :}$$

- k est le coefficient pseudo-statique adimensionnel défini ci-dessus ;
- γ_w le poids volumique de l'eau ;
- h la profondeur de la retenue.

Les accélérations maximales prises en compte pour le séisme SES sont :

- $a_g = 0,24$ g pour l'accélération horizontale ;
- $a_{vg} = 0,22$ g pour l'accélération verticale.

Dans le cas des calculs actuels, le cas le plus pessimiste est celui qui a tendance à maximiser les contraintes de traction et à minimiser la résistance à l'effort tranchant au contact. Par conséquent, l'accélération verticale est uniquement considérée ascendante dans les calculs.

4. METHODOLOGIE

4.1. LOGICIEL DE CALCUL

Les calculs sont effectués à l'aide du logiciel SOURIS, développé par ARTELIA pour la stabilité des ouvrages rigides en présence d'eau.

Ce logiciel utilise l'hypothèse des poutres (Navier / blocs rigides) pour calculer les contraintes au contact ouvrages / fondation. Les états-limites sont étudiés au contact barrage / fondation.

4.2. SITUATIONS DE PROJET

Les situations de projet étudiées sont détaillées dans le tableau ci-après.

Tableau 2- Situations de projet étudiées

Situations de projet	Combinaison d'actions	Désignation	Niveau d'eau amont	Niveau d'eau aval	Profils de calcul concernés
Situation normale	Quasi-permanente	N1	RN = 940,00 m NGF	914,00 m NGF	2 + 4
Situation rare de défaillance du drainage	Rare	R1	RN = 940,00 m NGF	914,00 m NGF	2 + 4
Situation exceptionnelle de crue	Rare	R2	PHE = 941,10 m NGF	921,66 m NGF	2 + 4
Situation rare de crue de chantier	Rare	R3	Q100 = 928,40 m NGF	914,00 m NGF	1 + 3
Situation accidentelle sismique	Extrême	E1	RN = 940,00 m NGF	914,00 m NGF	2 + 4
Situation extrême de crue	Extrême	E2	Cote de la crête = 942,00 m NGF	921,66 m NGF	2 + 4

Toutes les situations de projet, à l'exception de la situation R3, concernent l'ouvrage définitif après travaux (profils de calculs 2 et 4). La situation de projet R3, correspondant à la crue de chantier, concerne l'ouvrage en phase travaux (profils de calculs 1 et 3).

4.3. ETATS-LIMITES ET CRITERES DE STABILITE

Trois états limites sont étudiés :

- L'état limite d'extension des fissures ;
- L'état limite de résistance à l'effort tranchant ;
- L'état limite de flottaison.

Dans la mesure où les ouvrages sont fondés au rocher et où les contraintes transmises au rocher demeurent faibles (voir §0), l'état limite de résistance à la compression n'est pas directement étudié et est supposé satisfait pour l'ensemble des situations de projet.

4.3.1. Etat limite d'extension des fissures

La condition de non-fissuration s'écrit :

$$\sigma'_N(x) \geq -f_{tk}/\gamma_{mft}$$

- x est la position dans la section de longueur L où l'on examine si la fissure est ouverte ou non ($x = 0$ correspond à la vérification au droit du parement amont) ;
- $\sigma'_N(x)$ est la contrainte effective normale calculée à la position x de la section étudiée, obtenue par linéarisation de la contrainte effective ;
- f_{tk} est la valeur caractéristique de la résistance à la traction du matériau examiné. Dans ce cas f_{tk} vaut zéro puisque la résistance à la traction est considérée nulle à l'interface barrage / fondation ;
- γ_{mft} est le coefficient partiel venant affecter la valeur caractéristique de la résistance à la traction du matériau, et dépendant de la combinaison d'actions examinée.

Dans le cas où le critère n'est pas vérifié, un calcul itératif de l'ouverture de la fissure est réalisé jusqu'à atteindre un état de stabilisation de la longueur fissurée.

4.3.2. Etat limite de résistance à l'effort tranchant

La condition d'état-limite de résistance à l'effort tranchant s'exprime de la façon suivante :

$$\frac{c_k}{\gamma_{mC}} \cdot L' + \frac{N \cdot (\tan \varphi)_k}{\gamma_{mtan\varphi}} \geq \gamma_{d1} \cdot T$$

- c_k et $(\tan \varphi)_k$ les valeurs caractéristiques de la cohésion et de la tangente de l'angle de frottement interne (ici pris au contact barrage / fondation) ;
- L' la longueur de la section non fissurée étudiée, telle que calculée sous la combinaison d'actions considérée ;
- N et T les composantes normale et tangentielle des actions agissant sur la section étudiée, issues de la combinaison d'actions considérée ;
- γ_{mC} et $\gamma_{mtan\varphi}$ les coefficients partiels venant affecter les valeurs caractéristiques des résistances au cisaillement du matériau et dépendant de la combinaison d'actions considérée ;
- γ_{d1} le coefficient de modèle de l'état limite de résistance à l'effort tranchant, dépendant de la combinaison d'actions considérée.

4.3.3. Etat limite de flottaison

La condition de flottaison s'écrit de la façon suivante :

$$F_f = \frac{N'}{U} = \frac{N - U}{U}$$

- N est la composante normale des forces agissant sur la section étudiée ;
- U est la résultante des pressions interstitielles régnant au niveau de la section étudiée.

4.3.4. Critères de stabilité

Les critères d'état-limite d'ouverture des fissures sont les suivantes :

Tableau 3- Critères d'ouverture des fissures

Combinaisons d'actions	Condition d'état limite
Quasi-permanentes	Condition de non-fissuration
Rares	Ouverture au maximum jusqu'au voile de drainage ou 25 % maximum de la section fissurée en absence de voile de drainage
Extrêmes	Pas de condition imposée

Aucune condition n'est imposée pour l'état-limite d'ouverture des fissures dans le cas d'une situation extrême de crue, mais les calculs seront réalisés pour vérifier la condition de stabilité à l'effort tranchant.

Les valeurs des coefficients de sécurité partiels et globaux utilisées lors des différents calculs sont résumées dans le tableau ci-après.

Tableau 4- Valeurs des coefficients partiels et globaux pour les calculs de stabilité

Combinaisons d'actions	γ_{mft}	γ_{mC}	$\gamma_{mtan\phi}$	γ_{d1}
Quasi-permanentes	3	3	1.5	1
Rares	3	2	1.2	1
Extrêmes	1	1	1	1

Les conditions d'état-limite de flottaison sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 5- Critères d'état limite de flottaison

Combinaisons d'actions	Condition d'état limite
Quasi-permanentes	Marge de flottaison $F_f > 15\%$
Rares	Marge de flottaison $F_f > 5\%$
Extrêmes	Marge de flottaison $F_f > 0\%$

5. RESULTATS

Les résultats sont présentés sous la forme de tableaux résumant pour chaque section de calcul et chaque situation de projet :

- L'intensité et la direction des efforts appliqués ;
- Les contraintes calculées au contact ouvrage / fondation ;
- La longueur fissurée (exprimée en pourcentage de la longueur du contact) ;
- Le critère d'état limite d'effort tranchant ;
- Le critère d'état limite de flottaison.

La convention des signes utilisée implique :

- Un effort horizontal positif vers l'aval ;
- Un effort vertical positif vers le haut ;
- Une contrainte de compression positive.

5.1. BARRAGE

5.1.1. Barrage en phase travaux (profil 1)

Tableau 6- Barrage en phase travaux (profil 1) – Synthèse des actions

Situation de projet	Action	Composante verticale (kN)	Composante horizontale (kN)
R3	Poids propre	- 6 924	0
	Poussée hydrostatique amont	-220	2 977
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 684	0
	Résultante	-4 460	2 977

Tableau 7- Barrage en phase travaux (profil 1) – Vérifications des critères de stabilité

Situation de projet	Etat limite d'extension des fissures		Etat limite de résistance à l'effort tranchant		Etat limite de flottaison		Contraintes au pied amont (kPa)	Contraintes au pied aval (kPa)
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère		
R3	0%	<25%	1,08	>1	166%	>5%	111	294

La stabilité du barrage en phase travaux est justifiée.

5.1.2. Barrage après travaux (profil 2)

Tableau 8- Barrage après travaux (profil 2) – Synthèse des actions

Situation de projet	Action	Composante verticale (kN)	Composante horizontale (kN)
N1	Poids propre	- 10 757	0
	Poussée hydrostatique amont	- 241	3 380
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 532	0
	Résultante	- 8 466	3 380
R1	Poids propre	- 10 757	0
	Poussée hydrostatique amont	- 241	3 380
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	3 510	0
	Résultante	- 7 488	3 380
R2	Poids propre	- 10 757	0
	Poussée hydrostatique amont	- 256	3 672
	Poussée hydrostatique aval	- 196	- 293
	Sous-pressions	3 964	0
	Résultante	- 7 245	3 379
E1	Poids propre	- 10 757	0
	Poussée hydrostatique amont	- 241	3 380
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 532	0
	Force d'inertie	452	1 721
	Poussée hydrodynamique	0	631
	Résultante	- 8 015	5 732
E2	Poids propre	- 10 757	0
	Poussée hydrostatique amont	- 268	3 920
	Poussée hydrostatique aval	- 270	- 405
	Sous-pressions	4 285	0
	Résultante	- 7 010	3 515

Tableau 9- Barrage après travaux (profil 2) – Vérifications des critères de stabilité

Situation de projet	Etat limite d'extension des fissures		Etat limite de résistance à l'effort tranchant		Etat limite de flottaison		Contraintes au pied amont (kPa)	Contraintes au pied aval (kPa)
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère		
N1	0%	0%	1,45	>1	334%	>15%	267	360
R1	0%	<25%	1,60	>1	213%	>5%	227	328
R2	0%	<25%	1,55	>1	286%	>5%	211	326
E1	0%	<100%	1,22	>1	317%	>0%	31	563
E2	0%	<100%	1,73	>1	164%	>0%	174	345

La stabilité du barrage après travaux est justifiée.

5.2. EVACUATEUR DE CRUES

5.2.1. Evacuateur de crues en phase travaux (profil 3)

Tableau 10- Evacuateur de crue en phase travaux (profil 3) – Synthèse des actions

Situation de projet	Action	Composante verticale (kN)	Composante horizontale (kN)
R3	Poids propre	- 6 637	0
	Poussée hydrostatique amont	-220	2 977
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 684	0
	Résultante	-4 173	2 977

Tableau 11- Evacuateur de crue en phase travaux (profil 3) – Vérifications des critères de stabilité

Situation de projet	Etat limite d'extension des fissures		Etat limite de résistance à l'effort tranchant		Etat limite de flottaison		Contraintes au pied amont (kPa)	Contraintes au pied aval (kPa)
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère		
R3	0%	<25%	1,01	>1	155%	>5%	73	306

La stabilité de l'évacuateur de crue en phase travaux est justifiée.

5.2.2. Evacuateur de crues après travaux (profil 4)

Tableau 12- Evacuateur de crue après travaux (profil 4) – Synthèse des actions

Situation de projet	Action	Composante verticale (kN)	Composante horizontale (kN)
N1	Poids propre	- 10 305	0
	Poussée hydrostatique amont	- 241	3 380
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 532	0
	Résultante	- 8 014	3 380
R1	Poids propre	- 10 305	0
	Poussée hydrostatique amont	- 241	3 380
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	3 510	0
	Résultante	- 7 036	3 380
R2	Poids propre	- 10 305	0
	Poussée hydrostatique amont	- 256	3 664
	Poussée hydrostatique aval	- 200	- 293
	Sous-pressions	3 898	0
	Résultante	- 6 863	3 371
E1	Poids propre	- 10 305	0
	Poussée hydrostatique amont	- 241	3 380
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 532	0
	Force d'inertie	433	1 649
	Poussée hydrodynamique	0	631
	Résultante	- 7 581	5 659
E2	Poids propre	- 10 305	0
	Poussée hydrostatique amont	- 268	3 897
	Poussée hydrostatique aval	- 200	- 293
	Sous-pressions	4 050	0
	Résultante	- 6 722	3 604

Tableau 13- Barrage après travaux (profil 2) – Vérifications des critères de stabilité

Situation de projet	Etat limite d'extension des fissures		Etat limite de résistance à l'effort tranchant		Etat limite de flottaison		Contraintes au pied amont (kPa)	Contraintes au pied aval (kPa)
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère		
N1	0%	0%	1,37	>1	317%	>15%	227	367
R1	0%	<25%	1,51	>1	200%	>5%	186	335
R2	0%	<25%	1,47	>1	176%	>5%	179	329
E1	0%	<100%	1,16	>1	299%	>0%	6.3	555
E2	0%	<100%	1,62	>1	166%	>0%	141	357

La stabilité de l'évacuateur de crue après travaux est justifiée.



ANNEXE F
ETUDE DE STABILITE DU BARRAGE
– AVEC REHAUSSE



Barrage de La Lauch

Mission de Maîtrise d'œuvre du confortement du barrage

CALCULS DE STABILITE – SOLUTION AVEC REHAUSSE

Procédure n°21000314



Barrage de La Lauch
Mission de Maîtrise d'œuvre du confortement du barrage
Communauté Européenne d'Alsace
Calculs de stabilité – Solution avec réhausse

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI PAR	APPROUVÉ PAR	DATE
A	Première émission	C. MASSON / J.R. LHERBIER	G. DAUTOIS	09/09/22
Barrage, Hydroélectricité et Infrastructures 6, rue de Lorraine 38130 ECHIROLLES – TEL 04 76 33 40 00				

ARTELIA SAS
16 Rue Simone Veil – 93400 Saint-Ouen-sur-Seine

SOMMAIRE

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	4
2. RÉFÉRENCES – GUIDES DE CALCUL	5
3. HYPOTHÈSES DE CALCUL	6
3.1. Niveaux d'eau	6
3.2. Profils de calcul	6
3.2.1. Barrage après travaux (profil 1)	6
3.2.2. Evacuateur de crue à seuil libre après travaux (profil 2)	7
3.3. Caractéristiques des matériaux	8
3.3.1. Poids volumiques des matériaux	8
3.3.2. Paramètres de résistance à l'interface ouvrage / fondation	8
3.4. Actions	9
3.4.1. Actions statiques	9
3.4.2. Actions dynamiques	10
4. MÉTHODOLOGIE	12
4.1. Logiciel de calcul.....	12
4.2. Situations de projet	12
4.3. Etats-limites et critères de stabilité	12
4.3.1. Etat limite d'extension des fissures.....	12
4.3.2. Etat limite de résistance à l'effort tranchant	13
4.3.3. Etat limite de flottaison	13
4.3.4. Critères de stabilité	13
5. RÉSULTATS.....	15
5.1. Barrage après travaux (profil 1)	15
5.2. Evacuateur de crues après travaux (profil 2).....	16

TABLEAUX

Tableau 1- Niveaux d'eau	6
Tableau 2- Situations de projet étudiées.....	12
Tableau 3- Critères d'ouverture des fissures	14
Tableau 4- Valeurs des coefficients partiels et globaux pour les calculs de stabilité.....	14
Tableau 5- Critères d'état limite de flottaison	14

Tableau 6- Barrage après travaux (profil 1) – Synthèse des actions	15
Tableau 7- Barrage après travaux (profil 1) – Vérifications des critères de stabilité	16
Tableau 8- Evacuateur de crue après travaux (profil 2) – Synthèse des actions.....	17
Tableau 9- Barrage après travaux (profil 2) – Vérifications des critères de stabilité	18

FIGURES

Figure 1- Profil de calcul – Barrage après travaux	7
Figure 2- Profil de calcul – Evacuateur de crues après travaux	8
Figure 3- Exemple de profil de sous-pression prenant en compte le dispositif de drainage (Profil de calcul du barrage après travaux – Situation de Retenue Normale)	9
Figure 4- Exemple de profil de sous-pression en l'absence de dispositif de drainage (Profil de calcul du barrage en phase travaux – Situation de défaillance de drainage)	10

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La présente note de calcul concerne la vérification de la stabilité du barrage de La Lauch après confortement, dans le cas où celui-ci ne serait réhaussé de 3 m. Cette note constitue une annexe du rapport d'Avant-Projet Sommaire. Il convient de se référer à la note de stabilité sans réhausse du barrage pour la justification de la stabilité en phase travaux.

La stabilité du barrage est vérifiée au niveau de la coupe de plus grande hauteur ainsi qu'au niveau de l'évacuateur de crue à seuil libre.

2. REFERENCES – GUIDES DE CALCUL

- « Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages »
- Comité Français des Barrages et Réservoirs, «Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids,» Octobre 2012.

3. HYPOTHESES DE CALCUL

3.1. NIVEAUX D'EAU

Les niveaux d'eau sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les niveaux d'eau amont sont réhaussés de trois mètres par rapport à la solution sans réhausse tandis que les niveaux aval – conditionnés par le débit de la crue et les caractéristiques hydrauliques du chenal à l'aval du barrage – sont conservés.

Tableau 1- Niveaux d'eau

Situation	Amont	Aval
RN	943,00 m	914,00 m
PHE	944,10 m	921,66 m
Cote de danger	945,00 m	921,66 m

Par défaut, la cote de dangers est limitée à la crête de l'ouvrage. En effet, en l'absence d'étude spécifique permettant d'attester de la capacité du barrage à surverser et de l'absence de risque d'érosion par surverse au niveau du pied aval, la stabilité de l'ouvrage ne saurait être garantie pour une cote de retenue supérieure.

En l'absence de calculs hydrauliques pour le débit de crue correspondant à un niveau de réservoir à la cote de danger, le niveau aval de 921,66 m NGF est considéré par défaut dans cette étude. Cependant, une étude de sensibilité a été réalisée sur celui-ci montrant qu'il a relativement peu d'influence sur les résultats de l'étude de stabilité.

3.2. PROFILS DE CALCUL

Les profils de calcul en cas de réhausse du barrage sont obtenus à partir des profils de calcul après travaux en l'absence de réhausse. Les seules modifications apportées à ces profils sont :

- Augmentation de l'élévation de la crête et du seuil déversant de trois mètres ;
- Augmentation de l'élévation de la partie supérieure de la recharge aval en BCR de trois mètres.

Les autres caractéristiques géométriques restent inchangées par rapport à la solution sans réhausse. En particulier, l'élévation de l'interface entre le barrage et la fondation est supposée être à la cote 914 m NGF.

3.2.1. Barrage après travaux (profil 1)

La géométrie suivante est considérée pour la section du barrage non-déversante après travaux de confortement et réhausse. Ce profil est nommé « profil 5 » dans la suite de la note.

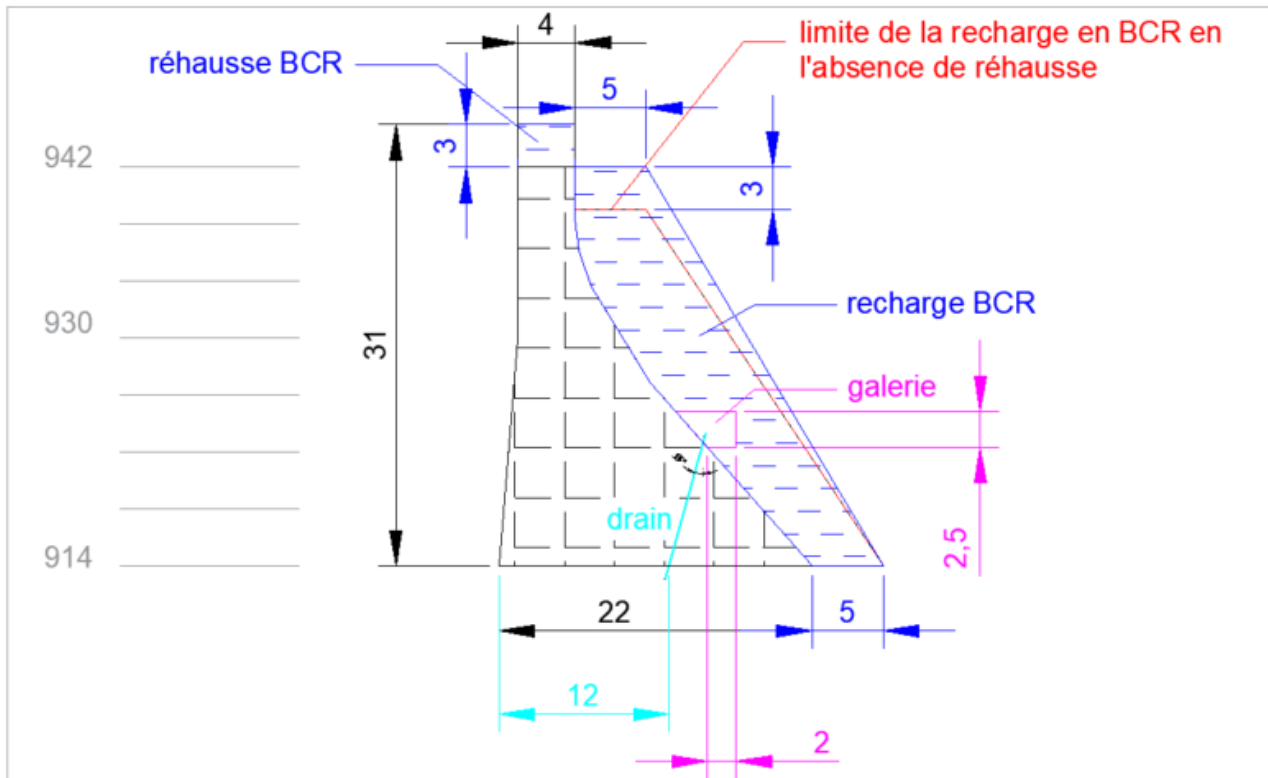


Figure 1- Profil de calcul – Barrage après travaux

3.2.2. Evacuateur de crue à seuil libre après travaux (profil 2)

La géométrie suivante est considérée au niveau de l'évacuateur de crue à seuil libre après travaux de confortement et réhausse. Ce profil est nommé « profil 2 » dans la suite de la note.

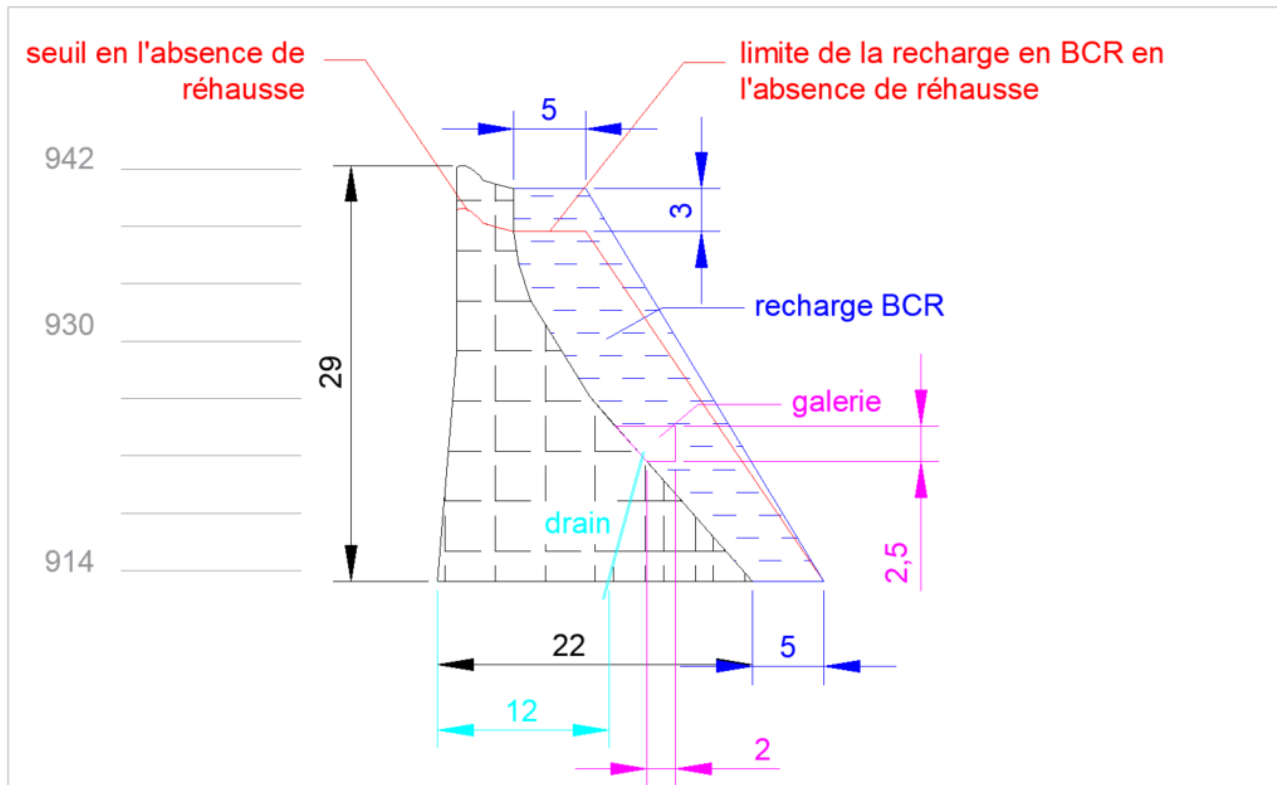


Figure 2- Profil de calcul – Evacuateur de crues après travaux

3.3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

3.3.1. Poids volumiques des matériaux

Les poids volumiques suivant sont considérés dans la suite des calculs :

- Maçonnerie : $\gamma_m = 24 \text{ kN/m}^3$;
- BCR : $\gamma_b = 24 \text{ kN/m}^3$;
- Eau : $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$.

3.3.2. Paramètres de résistance à l'interface ouvrage / fondation

L'ensemble des ouvrages sont supposés fondés au rocher. Les caractéristiques mécaniques suivantes sont prises en compte dans les calculs :

- $\varphi_k = 41^\circ$, l'angle de frottement à l'interface ouvrage / fondation ;
- $c_k = 0 \text{ kPa}$, la cohésion à l'interface ouvrage / fondation ;
- $f_{tk} = 0 \text{ kPa}$, la résistance à la traction à l'interface ouvrage / fondation.

3.4. ACTIONS

3.4.1. Actions statiques

Ces actions statiques suivantes concernent toutes les situations de projet :

- Le poids-propre des ouvrages (avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$) ;
 - La poussée hydrostatique amont ;
 - La poussée hydrostatique aval ;
 - Les sous-pressions appliquées au contact ouvrage / fondation.
- En l'absence de défaillance, les dispositifs de drainage de la fondation des ouvrages étudiés sont considérés dans les calculs. Le coefficient de rabattement pris en compte pour réduire le diagramme des sous-pressions est de 0,5. Le rabattement des sous-pressions est calculé suivant les recommandations du CFBR et illustré sur la Figure 3.

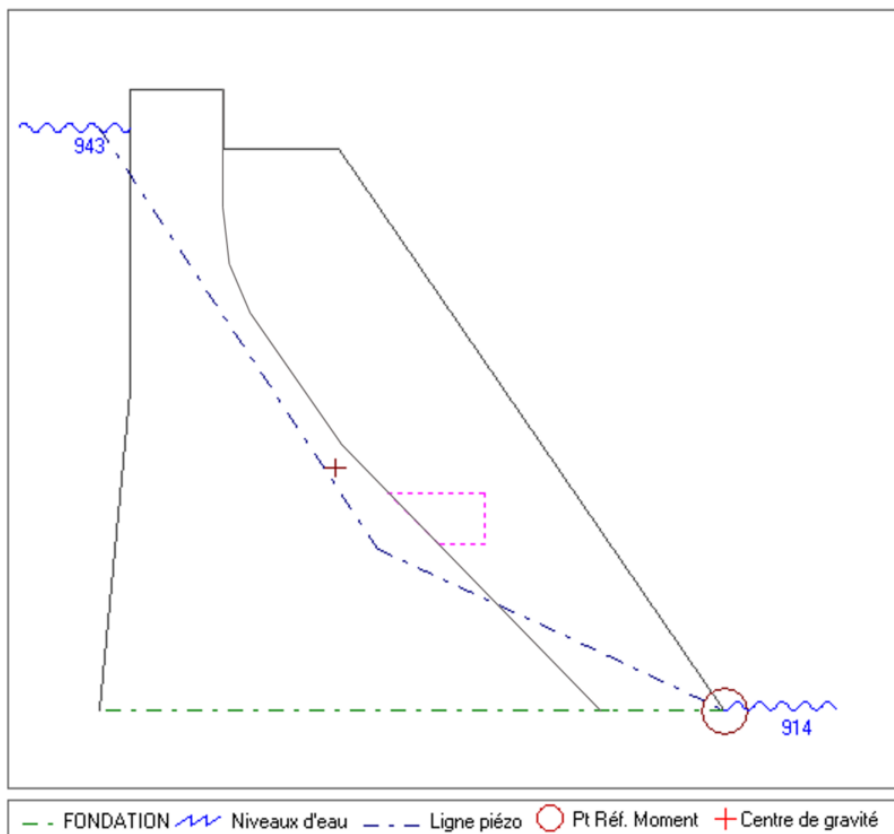


Figure 3- Exemple de profil de sous-pression prenant en compte le dispositif de drainage (Profil de calcul du barrage après travaux – Situation de Retenue Normale)

- En cas de défaillance du dispositif de drainage, un diagramme de sous-pression linéaire entre le niveau amont et le niveau aval est considéré, comme illustré sur la figure ci-dessous.

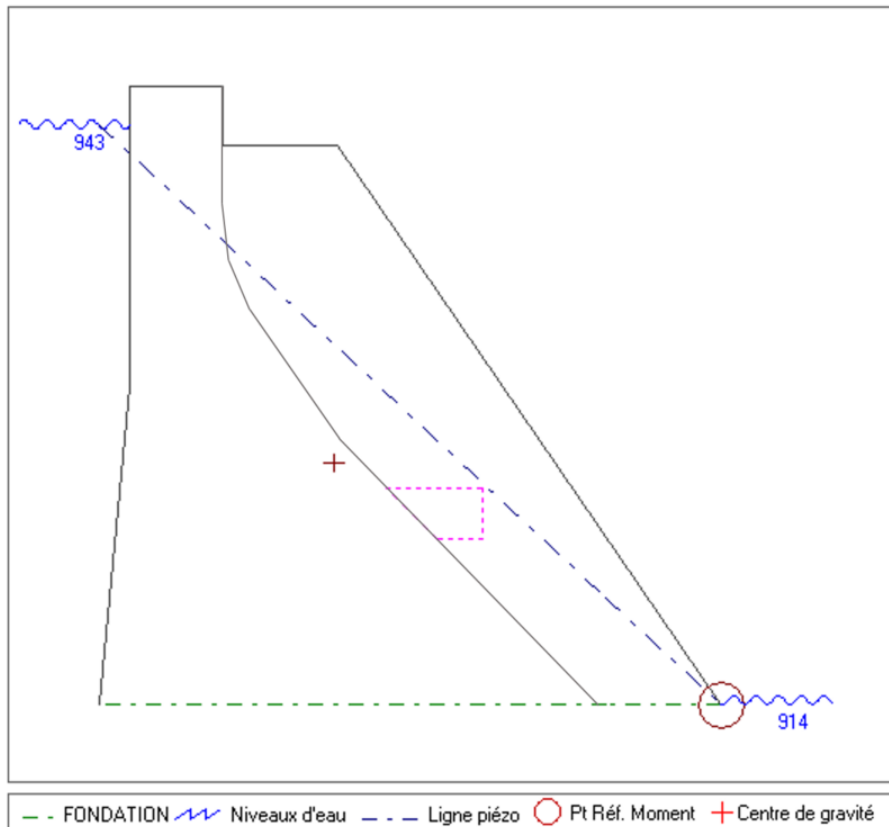


Figure 4- Exemple de profil de sous-pression en l'absence de dispositif de drainage (Profil de calcul du barrage en phase travaux – Situation de défaillance de drainage)

En l'attente de données bathymétrique, la poussée des sédiments sur le parement amont est négligée.

3.4.2. Actions dynamiques

Ces actions s'appliquent uniquement à la situation accidentelle sismique.

Les calculs sont effectués à l'aide d'une méthode pseudo-statique. Les sollicitations sismiques sont donc appliquées de manière simplifiée en tant qu'actions statiques individuelles jugées représentatives.

En cas de situation accidentelle sismique les actions additionnelles ci-dessous sont considérées :

- La force d'inertie issue de l'accélération de la masse de chaque coupe-type par le séisme. Cette force d'inertie s'applique au centre de gravité de la coupe-type. Son intensité est donnée par :

$$F = k V \gamma_b \text{ avec } k = \alpha \frac{a_g}{g} \text{ où :}$$

- k est le coefficient pseudo-statique adimensionnel ;
 - α est le coefficient sismique adimensionnel pris égal à 2/3 pour la composante horizontale et 0,20 pour la composante verticale ;
 - a_g est l'accélération maximale au sol ;
 - V est le volume du corps rigide ;
 - γ_b est le poids volumique du matériau.
- La surpression hydrodynamique calculée selon la méthode de Westergaard. Cette force est appliquée sur le parement amont du barrage en un point situé au 2/5 de la hauteur en partant du bas. Son intensité vaut :

$$F = \frac{7}{12} k \gamma_w h^2 \text{ avec :}$$

- k est le coefficient pseudo-statique adimensionnel défini ci-dessus ;
- γ_w le poids volumique de l'eau ;
- h la profondeur de la retenue.

Les accélérations maximales prises en compte pour le séisme SES sont :

- $a_g = 0,24$ g pour l'accélération horizontale ;
- $a_{vg} = 0,22$ g pour l'accélération verticale.

Dans le cas des calculs actuels, le cas le plus pessimiste est celui qui a tendance à maximiser les contraintes de traction et à minimiser la résistance à l'effort tranchant au contact. Par conséquent, l'accélération verticale est uniquement considérée ascendante dans les calculs.

4. METHODOLOGIE

4.1. LOGICIEL DE CALCUL

Les calculs sont effectués à l'aide du logiciel SOURIS, développé par ARTELIA pour la stabilité des ouvrages rigides en présence d'eau.

Ce logiciel utilise l'hypothèse des poutres (Navier / blocs rigides) pour calculer les contraintes au contact ouvrages / fondation. Les états-limites sont étudiés au contact barrage / fondation.

4.2. SITUATIONS DE PROJET

Les situations de projet étudiées sont détaillées dans le tableau ci-après.

Tableau 2- Situations de projet étudiées

Situations de projet	Combinaison d'actions	Désignation	Niveau d'eau amont	Niveau d'eau aval	Profils de calcul concernés
Situation normale	Quasi-permanente	N1	RN = 943,00 m NGF	914,00 m NGF	1 + 2
Situation rare de défaillance du drainage	Rare	R1	RN = 943,00 m NGF	914,00 m NGF	1 + 2
Situation exceptionnelle de crue	Rare	R2	PHE = 944,10 m NGF	921,66 m NGF	1 + 2
Situation accidentelle sismique	Extrême	E1	RN = 943,00 m NGF	914,00 m NGF	1 + 2
Situation extrême de crue	Extrême	E2	Cote de la crête = 945,00 m NGF	921,66 m NGF	1 + 2

4.3. ETATS-LIMITES ET CRITERES DE STABILITE

Trois états limites sont étudiés :

- L'état limite d'extension des fissures ;
- L'état limite de résistance à l'effort tranchant ;
- L'état limite de flottaison.

Dans la mesure où les ouvrages sont fondés au rocher et où les contraintes transmises au rocher demeurent faibles (voir §5), l'état limite de résistance à la compression n'est pas directement étudié et est supposé satisfait pour l'ensemble des situations de projet.

4.3.1. Etat limite d'extension des fissures

La condition de non-fissuration s'écrit :

$$\sigma'_N(x) \geq -f_{tk}/\gamma_{mft}$$

- x est la position dans la section de longueur L où l'on examine si la fissure est ouverte ou non ($x = 0$ correspond à la vérification au droit du parement amont) ;
- $\sigma'_N(x)$ est la contrainte effective normale calculée à la position x de la section étudiée, obtenue par linéarisation de la contrainte effective ;
- f_{tk} est la valeur caractéristique de la résistance à la traction du matériau examiné. Dans ce cas f_{tk} vaut zéro puisque la résistance à la traction est considérée nulle à l'interface barrage / fondation ;
- γ_{mft} est le coefficient partiel venant affecter la valeur caractéristique de la résistance à la traction du matériau, et dépendant de la combinaison d'actions examinée.

Dans le cas où le critère n'est pas vérifié, un calcul itératif de l'ouverture de la fissure est réalisé jusqu'à atteindre un état de stabilisation de la longueur fissurée.

4.3.2. Etat limite de résistance à l'effort tranchant

La condition d'état-limite de résistance à l'effort tranchant s'exprime de la façon suivante :

$$\frac{c_k}{\gamma_{mC}} \cdot L' + \frac{N \cdot (\tan \varphi)_k}{\gamma_{m \tan \varphi}} \geq \gamma_{d1} \cdot T$$

- c_k et $(\tan \varphi)_k$ les valeurs caractéristiques de la cohésion et de la tangente de l'angle de frottement interne (ici pris au contact barrage / fondation) ;
- L' la longueur de la section non fissurée étudiée, telle que calculée sous la combinaison d'actions considérée ;
- N et T les composantes normale et tangentielle des actions agissant sur la section étudiée, issues de la combinaison d'actions considérée ;
- γ_{mC} et $\gamma_{m \tan \varphi}$ les coefficients partiels venant affecter les valeurs caractéristiques des résistances au cisaillement du matériau et dépendant de la combinaison d'actions considérée ;
- γ_{d1} le coefficient de modèle de l'état limite de résistance à l'effort tranchant, dépendant de la combinaison d'actions considérée.

4.3.3. Etat limite de flottaison

La condition de flottaison s'écrit de la façon suivante :

$$F_f = \frac{N'}{U} = \frac{N - U}{U}$$

- N est la composante normale des forces agissant sur la section étudiée ;
- U est la résultante des pressions interstitielles régnant au niveau de la section étudiée.

4.3.4. Critères de stabilité

Les critères d'état-limite d'ouverture des fissures sont les suivantes :

Tableau 3- Critères d'ouverture des fissures

Combinaisons d'actions	Condition d'état limite
Quasi-permanentes	Condition de non-fissuration
Rares	Ouverture au maximum jusqu'au voile de drainage ou 25 % maximum de la section fissurée en absence de voile de drainage
Extrêmes	Pas de condition imposée

Aucune condition n'est imposée pour l'état-limite d'ouverture des fissures dans le cas d'une situation extrême de crue, mais les calculs seront réalisés pour vérifier la condition de stabilité à l'effort tranchant.

Les valeurs des coefficients de sécurité partiels et globaux utilisées lors des différents calculs sont résumées dans le tableau ci-après.

Tableau 4- Valeurs des coefficients partiels et globaux pour les calculs de stabilité

Combinaisons d'actions	γ_{mft}	γ_{mC}	$\gamma_{mtan\phi}$	γ_{d1}
Quasi-permanentes	3	3	1.5	1
Rares	3	2	1.2	1
Extrêmes	1	1	1	1

Les conditions d'état-limite de flottaison sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 5- Critères d'état limite de flottaison

Combinaisons d'actions	Condition d'état limite
Quasi-permanentes	Marge de flottaison $F_f > 15\%$
Rares	Marge de flottaison $F_f > 5\%$
Extrêmes	Marge de flottaison $F_f > 0\%$

5. RESULTATS

Les résultats sont présentés sous la forme de tableaux résumant pour chaque section de calcul et chaque situation de projet :

- L'intensité et la direction des efforts appliqués ;
- Les contraintes calculées au contact ouvrage / fondation ;
- La longueur fissurée (exprimée en pourcentage de la longueur du contact) ;
- Le critère d'état limite d'effort tranchant ;
- Le critère d'état limite de flottaison.

La convention des signes utilisée implique :

- Un effort horizontal positif vers l'aval ;
- Un effort vertical positif vers le haut ;
- Une contrainte de compression positive.

5.1. BARRAGE APRES TRAVAUX (PROFIL 1)

Tableau 6- Barrage après travaux (profil 1) – Synthèse des actions

Situation de projet	Action	Composante verticale (kN)	Composante horizontale (kN)
N1	Poids propre	- 12 005	0
	Poussée hydrostatique amont	- 281	4 205
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 828	0
	Résultante	- 9 458	4 205
R1	Poids propre	- 12 005	0
	Poussée hydrostatique amont	- 281	4 205
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	3 915	0
	Résultante	- 8 371	4 205

Situation de projet	Action	Composante verticale (kN)	Composante horizontale (kN)
R2	Poids propre	- 12 005	0
	Poussée hydrostatique amont	- 296	4 530
	Poussée hydrostatique aval	- 175	- 293
	Sous-pressions	4 256	0
	Résultante	- 8 220	4 237
E1	Poids propre	- 12 005	0
	Poussée hydrostatique amont	- 281	4 205
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 828	0
	Force d'inertie	504	1 921
	Poussée hydrodynamique	0	784
	Résultante	- 8 954	6 910
E2	Poids propre	- 12 005	0
	Poussée hydrostatique amont	- 308	4 805
	Poussée hydrostatique aval	- 175	- 293
	Sous-pressions	2 828	0
	Résultante	- 7 269	4 512

Tableau 7- Barrage après travaux (profil 1) – Vérifications des critères de stabilité

Situation de projet	Etat limite d'extension des fissures		Etat limite de résistance à l'effort tranchant		Etat limite de flottaison		Contraintes au pied amont (kPa)	Contraintes au pied aval (kPa)
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère		
N1	0%	0%	1,30	>1	334%	>15%	229	471
R1	0%	<25%	1,44	>1	214%	>5%	185	436
R2	0%	<25%	1,40	>1	193%	>5%	166	443
E1	0%	<100%	1,13	>1	317%	>0%	69	732
E2	0%	<100%	1,40	>1	139%	>0%	90	449

La stabilité du barrage après travaux est justifiée.

5.2. EVACUATEUR DE CRUES APRES TRAVAUX (PROFIL 2)

Tableau 8- Evacuateur de crue après travaux (profil 2) – Synthèse des actions

Situation de projet	Action	Composante verticale (kN)	Composante horizontale (kN)
N1	Poids propre	- 11 555	0
	Poussée hydrostatique amont	- 281	4 205
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 828	0
	Résultante	- 9 008	4 205
R1	Poids propre	- 11 555	0
	Poussée hydrostatique amont	- 281	4 205
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	3 915	0
	Résultante	- 7 921	4 205
R2	Poids propre	- 11 555	0
	Poussée hydrostatique amont	- 296	4 522
	Poussée hydrostatique aval	- 178	- 293
	Sous-pressions	4 256	0
	Résultante	- 7 773	4 229
E1	Poids propre	- 11 555	0
	Poussée hydrostatique amont	- 281	4 205
	Poussée hydrostatique aval	0	0
	Sous-pressions	2 828	0
	Force d'inertie	485	1 849
	Poussée hydrodynamique	0	784
	Résultante	- 8 523	6 838
E2	Poids propre	- 11 555	0
	Poussée hydrostatique amont	- 308	4 782
	Poussée hydrostatique aval	- 178	- 293
	Sous-pressions	4 256	0
	Résultante	- 7 785	4 489

Tableau 9- Barrage après travaux (profil 2) – Vérifications des critères de stabilité

Situation de projet	Etat limite d'extension des fissures		Etat limite de résistance à l'effort tranchant		Etat limite de flottaison		Contraintes au pied amont (kPa)	Contraintes au pied aval (kPa)
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère		
N1	0%	0%	1,24	>1	319%	>15%	189	479
R1	0%	<25%	1,36	>1	202%	>5%	144	443
R2	0%	<25%	1,33	>1	183%	>5%	127	448
E1	11%	<100%	1,08	>1	301%	>0%	- 92	723
E2	0%	<100%	1,51	>1	183%	>0%	98	478

La stabilité de l'évacuateur de crue après travaux est justifiée.



ANNEXE G

DETAIL QUANTITATIF ESTIMATIF

Confortement du barrage de La Lauch
 Avant-Projet Sommaire
 Détail Quantitatif Estimatif

Index	Désignation	Unité	Barrage sans réhausse			Barrage avec réhausse		
			Prix unitaire €	Quantité	Total €	Prix unitaire €	Quantité	Total €
000	TRAVAUX PRELIMINAIRES / PRIX GENERAUX							
001	Installations et repliement de chantier, y.c. études diverses et démobilisation/remobilisation	Forfait	624 785	1	624 785	921 469	1	921 469
002	Construction et effacement des pistes d'accès	Forfait	50 000	1	50 000	50 000	1	50 000
003	Modification des voiries et chemins	Forfait	211 500	1	211 500	630 000	1	630 000
004	Dérivation provisoire (batardeaux, y.c. mise en place, suppression et pompage)	Forfait	150 000	1	150 000	150 000	1	150 000
005	Purge à l'amont de la vidange de fond, y.c. évacuation	m3	20	500	10 000	20	500	10 000
	TOTAL TRAVAUX PRELIMINAIRES				1 046 285			1 761 469
100	RECHARGE AVAL							
101	Débroussaillage, abattage, dessouchage, décapage et mise en dépôt de la TV	m2	6	4 900	29 400	6	4 900	29 400
102	Déblais du perré maçonné et mise en dépôt	m3	20	4 800	96 000	20	4 800	96 000
103	Déblais en terrain meuble et mise en dépôt	m3	7	50 250	351 750	7	50 250	351 750
104	Béton de réglage	m3	500	783	391 250	500	1 260	630 000
105	Béton Compacté au Rouleau	m3	200	14 868	2 973 500	200	23 940	4 788 000
106	Béton Compacté au Rouleau enrichi (y.c. coffrage)	m3	400	3 050	1 220 000	400	3 400	1 360 000
107	Béton de masse	m3	500	80	40 000	500	80	40 000
108	Forage pour rideau de drainage (y.c. mise en station)	ml	150	400	60 000	150	450	67 500
109	Drains et conduites PVC Ø100 pour rideau de drainage	ml	15	400	6 000	15	450	6 750
	TOTAL RECHARGE AVAL				5 167 900			7 369 400
200	VIDANGE DE FOND, PRISE D'EAU ET GALERIE DE DRAINAGE							
201	Démolition soignée de la maçonnerie et mise en dépôt (réalésage vidange de fond)	m3	110	135	14 850	110	135	14 850
202	Démolition de la maçonnerie et mise en dépôt (maçonnerie sous recharge)	m3	20	65	1 300	20	65	1 300
203	Béton Haute Performance (y.c. ferrailage et coffrage)	m3	4 000	215	860 000	4 000	215	860 000
204	Béton Armé (y.c. coffrage et ferrailage)	m3	800	45	36 000	800	45	36 000
205	Dalle béton préfabriquée	m3	1 000	110	110 000	1 000	110	110 000
206	Joint waterstop	ml	50	60	3 000	50	60	3 000
207	Garde-corps	ml	200	30	6 000	200	30	6 000
208	Passerelle	ml	270	30	8 100	270	30	8 100
209	Conduites de prise d'eau	Forfait	15 000	1	15 000	15 000	1	15 000
210	Vannes de prise d'eau	Unité	5 000	2	10 000	5 000	2	10 000
211	Vanne de vidange et organe de manœuvre	Forfait	20 000	1	20 000	20 000	1	20 000
212	Equipements électriques divers	Forfait	10 000	1	10 000	10 000	1	10 000
213	Forage pour rideau de drainage (y.c. mise en station)	ml	150	400	60 000	150	450	67 500
214	Drains et conduites PVC Ø100 pour rideau de drainage	ml	15	400	6 000	15	450	6 750
	TOTAL VIDANGE DE FOND, PRISE D'EAU ET GALERIE DE DRAINAGE				1 160 250			1 168 500
300	EVACUATEUR DE CRUES, BASSIN DE DISSIPATION ET CHENAL D'EVACUATION							
301	Sciage de la maçonnerie et mise en dépôt	m2	490	176	86 240	490	176	86 240
302	Déblais en terrain meuble et mise en dépôt	m3	7	1 750	12 250	7	1 750	12 250
303	Déblais en terrain rocheux et mise en dépôt	m3	50	1 750	87 500	50	1 750	87 500
304	Béton Armé (y.c. coffrage et ferrailage)	m3	800	474	379 407	800	462	369 307
305	Ancrages hautes adhérences (y.c. forage)	Unité	240	30	7 200	240	30	7 200
306	Joint waterstop	ml	50	200	10 000	50	200	10 000
307	Passerelle de franchissement	Forfait	160 000	1	160 000	160 000	1	160 000
	TOTAL EVACUATEUR DE CRUES, BASSIN DE DISSIPATION ET CHENAL D'EVACUATION				742 597			732 497
400	BARRAGE ET PERTUIS LATERAUX							
401	Mise en dépôt des gardes-corps et parapets, et réinstallation	ml	75	-	-	75	500	37 500
402	Arasement de la crête et traitement	m2	15	-	-	15	1 000	15 000
403	Sciage de la maçonnerie et mise en dépôt	m2	490	54	26 264	490	54	26 264
404	Béton de masse (y.c. coffrage et ferrailage)	m3	500	273	136 300	500	526	263 200
405	Béton Compacté au Rouleau	m3	200	-	-	200	2 745	549 000
406	Béton Compacté au Rouleau enrichi (y.c. coffrage)	m3	400	-	-	400	855	342 000
	TOTAL BARRAGE ET PERTUIS LATERAUX				162 564			1 232 964
500	TRAVAUX ANNEXES							
501	Démolition de la microcentrale et mise en décharge	Forfait	5 000	1	5 000	5 000	1	5 000
502	Démolition des bâtiments à l'aval RG	Forfait		1	-		1	-
503	Démolition du belvédère RD	Forfait	5 000	1	5 000	5 000	1	5 000
504	Bâtiments d'exploitation RG	Forfait	75 000	1	75 000	75 000	1	75 000
505	Dispositif d'auscultation	Forfait	70 000	1	70 000	90 000	1	90 000
	TOTAL ANNEXES				155 000			175 000
600	MESURES ENVIRONNEMENTALES							
601	Mesures compensatoires	Forfait	900 000	1	900 000	1 500 000	1	1 500 000
	TOTAL MESURES ENVIRONNEMENTALES				900 000			1 500 000
	SOUS TOTAL H.T				9 334 596			13 939 830
	DIVERS & ALEAS (GENIE CIVIL)	%	20%		1 686 919	20%		2 487 966
	ETUDES DE CONCEPTION DU PROJET	%	6%		560 076	6%		836 390
	TOTAL GENERAL HORS TAXES				11 581 591			17 264 185