



Barrage de La Lauch

Mission de Maîtrise d'œuvre du confortement du barrage

AVP – DOSSIER TECHNIQUE DE L'OUVRAGE

Procédure n°21000314



Barrage de La Lauch

Mission de Maîtrise d'œuvre du confortement du barrage

Communauté Européenne d'Alsace

AVP – Dossier technique de l'ouvrage

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI PAR	APPROUVÉ PAR	DATE
B	Version finale avec intégration des commentaires du MOA	J.R. LHERBIER / F. ANDRIAN	G. DAUTOIS	02/11/22
A	Première émission – Version provisoire	J.R. LHERBIER / F. ANDRIAN	G. DAUTOIS	26/09/22

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

AVP – Dossier technique de l'ouvrage
BARRAGE DE LA LAUCH

SOMMAIRE

1. OBJET ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE	7
1.1. Objet de l'étude d'avant-projet	7
1.1.1. Confortement du barrage de la Lauch	7
1.1.2. Avancement de la Maîtrise d'œuvre de l'opération.....	8
1.1.3. Conclusion de l'étude préliminaire précédente	8
1.1.4. Objectifs de l'étude d'avant-projet	9
1.2. Caractéristiques actuelles de l'ouvrage	9
1.2.1. Description générale	9
1.2.2. Caractéristiques détaillées.....	10
1.2.3. Historique des travaux	13
1.3. Problématiques liées à la recharge aval.....	14
1.3.1. Désordres et justification de la stabilité	14
1.3.2. Synthèse des études antérieures	14
1.3.2.1. Expertise 1991 – F. KERN	14
1.3.2.2. Contre-expertise Coyne et Bellier 1992	14
1.3.2.3. Expertise ISL 1996	15
1.3.2.4. Dossier de révision spéciale SOGREAH 2004.....	16
1.3.2.5. Compléments SOGREAH 2009 – 2010.....	16
1.3.2.6. Étude sismique dynamique SOGREAH 2011 – 2012	16
1.3.2.7. Etude de stabilité - IRSTEA 2019	17
1.3.2.8. Etude ARTELIA 2012 – 2021	17
2. DONNÉES D'ENTRÉES	18
2.1. Topographie et bathymétrie.....	18
2.1.1. Données.....	18
2.1.2. Topographie du bassin versant	18
2.1.3. Bathymétrie et sédiments du lac	19
2.1.4. Lois HSV	20
2.2. Hydrologie et crues de référence.....	21
2.3. Niveaux d'eau	21
2.4. Géologie et Géotechnique	22
2.4.1. Contexte géologique régional	22

2.4.2.	Contexte géologique local	23
2.4.3.	Géologie au droit de l'ouvrage	24
2.4.3.1.	Description des reconnaissances	24
2.4.3.2.	Description lithologique des terrains.....	29
2.4.3.3.	Stabilité des fondations et appuis	30
2.5.	Essais sur site et en laboratoire	31
2.5.1.	Fondation rocheuse sous la maçonnerie	31
2.5.2.	Fouille aval.....	31
2.5.3.	Maçonnerie.....	31
2.5.3.1.	Essais Lugeon	31
2.5.3.2.	Essais en laboratoire	32
2.5.4.	Recharge aval.....	32
2.5.4.1.	Structure générale.....	32
2.5.4.2.	Nature des matériaux.....	32
2.5.4.3.	Caractéristiques mécaniques.....	33
2.6.	Caractéristiques mécaniques retenues	33
2.7.	Sismicité du site	34
3.	CRITÈRES DE CONCEPTION	36
3.1.	Dimensionnement du barrage	36
3.2.	Evacuation des crues	36
3.2.1.	Evacuateur de crues	36
3.2.1.1.	Evacuateur de crues existant.....	36
3.2.1.2.	Nouvel évacuateur de crues	37
3.2.2.	Vidange de fond	38
3.3.	Autres critères.....	39
3.3.1.	Galerie de drainage	39
3.3.2.	Compatibilité avec un futur projet hydroélectrique.....	39
4.	PRINCIPES GENERAUX DU CONFORTEMENT	40
4.1.	Conservation du corps du barrage en maçonnerie.....	40
4.2.	Démolition de la Recharge aval existante et de la fouille aval .	40
4.3.	Nouvelle recharge aval en béton	41
4.3.1.	Caractéristiques	41
4.3.2.	Matériaux	42
4.3.2.1.	Corps de la recharge en BCR.....	42

4.3.2.2.	BCR enrichi au coulis de ciment sur l'extérieur de la recharge.....	42
4.3.2.3.	Couche supérieure en BCV au droit de l'évacuateur	43
4.4.	Vidange de fond	43
4.5.	Galerie de vidange/prise d'eau.....	45
4.6.	Galerie de drainage	45
4.7.	Drainage de la fondation	46
4.8.	Drainage de la recharge.....	47
4.9.	Modification des ouvrages d'évacuation des crues.....	47
4.9.1.	Seuil déversant.....	48
4.9.2.	Coursier	48
4.9.3.	Chenal de restitution.....	48
4.10.	Passerelle de franchissement du seuil	48
4.11.	Dispositif d'auscultation.....	49
4.12.	Etude du réemploi et de la valorisation des matériaux d'excavation et de démolition	49
5.	SOLUTION TECHNIQUE SANS REHAUSSE	51
5.1.	Spécificités techniques de la solution	51
5.1.1.	Recharge en BCR	51
5.1.2.	Seuil de l'évacuateur de crues	51
5.1.3.	Comblement des pertuis.....	51
5.1.4.	Dimensionnement du bassin de dissipation	51
5.1.5.	Etude de stabilité	52
5.2.	Phasage de construction.....	53
5.2.1.	Principe du phasage : priorité à la ressource en eau	53
5.2.2.	Phase 0 : vidange, installation de chantier et gestion des eaux.....	53
5.2.3.	Phase 1 : démolition et vidange de fond	54
5.2.4.	Phase 2 : galerie de drainage et érection de la recharge BCR	55
5.2.5.	Phase 3 : nouvel évacuateur de crues et fin de la recharge BCR	55
5.2.6.	Synthèse	56
5.3.	Planning prévisionnel de construction.....	56
6.	SOLUTION TECHNIQUE AVEC REHAUSSE	59
6.1.	Spécificités techniques de la solution	59
6.1.1.	Recharge en BCR	59

6.1.2.	Seuil de l'évacuateur de crues	59
6.1.3.	Comblement des pertuis existants.....	59
6.1.4.	Réhausse du barrage en BCR	59
6.1.5.	Dimensionnement du bassin de dissipation	60
6.1.6.	Etude de stabilité	60
6.2.	Phasage de construction.....	61
6.2.1.	Principe du phasage : priorité à la ressource en eau	61
6.2.2.	Phase 0 : vidange, installation de chantier et gestion des eaux.....	62
6.2.3.	Phase 1 : démolition et vidange de fond	62
6.2.4.	Phase 2 : galerie de drainage et érection de la recharge BCR	63
6.2.5.	Phase 3 : nouvel évacuateur de crues et fin de la recharge BCR	63
6.2.6.	Phase 4 : réhausse du barrage	64
6.2.7.	Synthèse	64
6.3.	Planning prévisionnel de construction.....	65
6.4.	Insertion paysagère	68
6.4.1.	Recharge de finition	68
6.4.2.	Parements en béton	69
7.	ESTIMATION FINANCIÈRE DES TRAVAUX	71
8.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	72
8.1.	Compatibilité des variantes de confortement.....	72
8.2.	Besoins en études complémentaires	72
8.2.1.	Besoin communs aux deux variantes	72
8.2.2.	Besoins spécifiques à la variante avec réhausse	73
8.3.	Pistes d'optimisation en phase PRO	74
ANNEXE A	PLANS DE L'OUVRAGE EXISTANT.....	76
ANNEXE B	ANALYSE CRITIQUE DES DÉBITS DE CRUE.....	77
ANNEXE C	DESCRIPTION DES GRAUWACKES SELON LA MÉTHODE DE HOEK & BROWN.....	78
ANNEXE D	PLANS DE L'OUVRAGE CONFORTÉ.....	79
ANNEXE E	ETUDE DE STABILITÉ DU BARRAGE – SANS REHAUSSE	

ANNEXE F ETUDE DE STABILITÉ DU BARRAGE – AVEC REHAUSSE

81

ANNEXE G DÉTAIL QUANTITATIF ESTIMATIF 82

TABLEAUX

Tableau 1 - Fiche synoptique du barrage de La Lauch	11
Tableau 2 – Caractéristiques mécaniques des matériaux.....	33
Tableau 3 – Caractéristiques mécaniques des interfaces	34
Tableau 4 – Dispositif d’auscultation complémentaire	49
Tableau 5 – Vérification des critères de stabilité – Barrage sans réhausse – Profil non-déversant.....	52
Tableau 6 – Vérification des critères de stabilité – Barrage sans réhausse – Profil déversant	53
Tableau 7 – Synthèse du phasage de construction – solution technique sans réhausse.....	56
Tableau 8 – Vérification des critères de stabilité – Barrage avec réhausse – Profil non-déversant.....	61
Tableau 9 – Vérification des critères de stabilité – Barrage avec réhausse – Profil déversant	61
Tableau 10 – Synthèse du phasage de construction – solution technique sans réhausse.....	65
Tableau 11 – Estimation financière des travaux (H.T.).....	71

FIGURES

Figure 1 - Vue du barrage depuis le crête rive gauche (à g.) et vue du réservoir du lac de la Lauch (à dr.) ..	7
Figure 2 – Schéma des phases successives de la mission de maîtrise d’œuvre	8
Figure 3 – Coupe du barrage actuel au droit de la vidange de fond	10
Figure 4 – Volumes réglementaires du barrage de la Lauch	10
Figure 5 - Topographie du bassin versant du barrage de la Lauch et définition (à dr.) de l’aire d’alimentation du barrage (sources Géoportail et CEA)	18
Figure 6 – Profil en long de la rivière Lauch et jonctions avec ses affluents (source CEA).....	19
Figure 7 – Illustrations des mesures bathymétriques et sédimentaires (sources CEA)	19
Figure 8 - Courbe Hauteur / Volume	20
Figure 9 - Courbe Hauteur / Surface	20
Figure 10 - Contexte géologique régional	23
Figure 11 - Implantation des reconnaissances IMSRN 2006	28
Figure 12 - Profils de sismique réfraction considéré pour la détermination du toit du substratum rocheux	29
Figure 13 - Spectre des séismes caractéristiques	35
Figure 14 – Illustration des déversoirs de crue existants.....	37
Figure 15 – Implantation du nouvel évacuateur unique de sécurité	38
Figure 16 - Principe de la nouvelle galerie de vidange de fond visitable	39
Figure 17 - Principe des vannes de la vidange de fond.....	43
Figure 18 – Relation « charge-débit » de la vanne de fond projetée	44
Figure 19 – Position de la galerie de drainage (en pointillés rouge)	46
Figure 20 - Exemple du principe de drainage depuis la galerie de collecte des drains	46
Figure 21 - Exemple du principe de drainage depuis la galerie de drainage (à g.) et depuis la face aval de la recharge (à dr.).....	47
Figure 22 -Illustration de la recharge aval de finition lors des études antérieures (dossier CTPBOH 2021) ..	68
Figure 23 - Exemples de parement en béton matricé du coursier d'un évacuateur de crues	70
Figure 24 - Schéma de principe de l'implantation des reconnaissances géophysiques et géotechniques complémentaires	73
Figure 25 - Schéma de principe de l'implantation des puits pour réalisation des essais de perméabilité ...	74

1. OBJET ET CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1. OBJET DE L'ETUDE D'AVANT-PROJET

1.1.1. Confortement du barrage de la Lauch

Le barrage de la Lauch est le dernier barrage alsacien propriété de l'Etat. Il a vocation à être rétrocédé par convention de transfert à la Collectivité européenne d'Alsace (CeA) à l'issue des travaux nécessaires de confortement (voir §1.3). La CeA est désignée par l'Etat en tant que Maître d'ouvrage principal de cette opération de travaux via cette même convention.



Figure 1 - Vue du barrage depuis la crête rive gauche (à g.) et vue du réservoir du lac de la Lauch (à dr.)

La CeA a confié en mars 2022 la mission de maîtrise d'œuvre des travaux de confortement au bureau d'études ARTELIA, agréé en France pour conduire des études et des travaux sur les barrages.

Le barrage de la Lauch assure une fonction (en duo avec le barrage du lac du Ballon) au bon équilibre quantitatif de la ressource en eau sur le territoire de la Communauté de Communes de la Région de Guebwiller (CCRG), à travers le soutien des étiages de la rivière Lauch pour assurer notamment les besoins en eau des milieux aquatiques et des usages (principalement l'alimentation en eau potable de la vallée de Guebwiller pour sa population et ses industries agro-alimentaires).

Dans une logique d'approche globale et durable de l'opération, en conformité avec les orientations et dispositions du SDAGE Rhin-Meuse 2022-2027 et du Plan d'Adaptation et d'Atténuation au Changement Climatique du bassin Rhin-Meuse 2019-2024, et dans le respect de la mise en œuvre des enjeux et dispositions du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) de la Lauch, **les études de maîtrise d'œuvre intègrent dès le départ les effets possibles du changement climatique** à travers une Etude Préliminaire (EP) de « vérification de la résilience de la future retenue d'eau du barrage de la Lauch après travaux » à l'horizon de la fin du siècle en 2100.

1.1.2. Avancement de la Maîtrise d'œuvre de l'opération

L'Etude Préliminaire (EP) est désormais terminée. Le présent rapport concerne la phase suivante dite « d'avant-projet » (AVP). Les phases successives de la mission de la MOE sont schématisées ci-dessous.

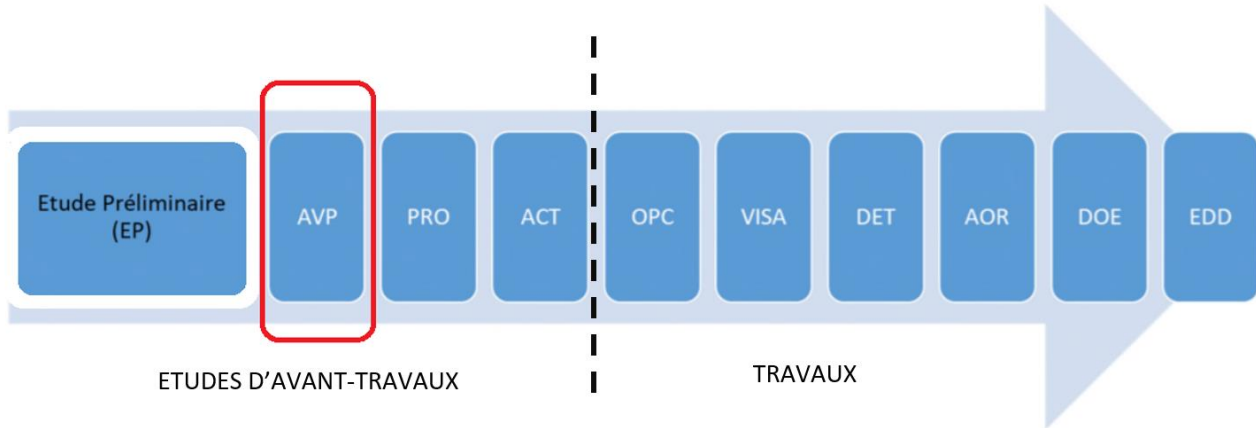


Figure 2 – Schéma des phases successives de la mission de maîtrise d'œuvre

1.1.3. Conclusion de l'étude préliminaire précédente

A partir des projections pluviométriques locales MOSARH21 (Moselle Sarre Rhin en l'an 2100) issues des prévisions climatiques du GIEC, un modèle d'allocation des ressources en eau (Mike Hydro Basin) a simulé la tête du bassin versant de la Lauch et la gestion des barrages de la Lauch et du Ballon pour soutenir les étiages de la rivière. Le modèle a été préalablement calé sur les données de ces 20 dernières années.

Les résultats de la modélisation sont les suivants, dans le cadre des hypothèses retenues :

- En hiver : les crues seront plus fréquentes mais un remplissage du barrage de la Lauch sera possible jusqu'à la mi-mars ;
- Le reste de l'année :
 - Baisse importante des débits moyens mensuels (modules) de la rivière (-13 à -15%) ;
 - Etiages nettement plus fréquents de la rivière, avec une évolution des périodes de non-atteinte du débit seuil d'alerte à Linthal (moins de 150 l/s) : +250% d'observation sur l'année et jusqu'à 60 jours consécutifs chaque année (+50%) ;
 - Déficit de plus de 300 000 m³ d'eau chaque année dans la rivière pour conserver les capacités actuelles de soutien des étiages.

Sur la base de ces résultats, plusieurs scénarios correctifs ont été étudiés pour conserver la capacité actuelle de soutien des étiages de la rivière à l'horizon 2100 :

- Construction d'un nouveau barrage ;
- Dérivation de cours d'eau pour mieux alimenter la retenue du lac du Ballon
- Réhausse du barrage de la Lauch.

Parmi ces trois scénarios étudiés, le scénario de réhausse de trois mètres du barrage de la Lauch présente le meilleur résultat de l'analyse coût/bénéfices/limitation des impacts environnementaux.

Une réhausse de 3 m est compatible avec la coexistence sans concurrence des fonctions de protection contre les crues et de soutien d'étiage. Au-delà d'une réhausse de 3 m, un risque de non-remplissage de la retenue existe.

Le surcoût d'une telle réhausse du barrage vis-à-vis des travaux de confortement planifiés sur l'ouvrage est estimé au stade d'étude préliminaire entre 5 et 6 millions d'euros HT, indépendamment des travaux envisagés sur la recharge aval.

Par ailleurs, l'augmentation du volume exploitable du lac de la Lauch permet de conforter la stratégie actuelle de gestion des étiages de la rivière à partir des deux barrages de la Lauch et du Ballon, avec un lac du Ballon en relais du lac de la Lauch en tant que réserve ultime (le taux de renouvellement du Lac du Ballon étant nettement moins performant que celui du lac de la Lauch).

Il a donc été proposé à la Collectivité européenne d'Alsace de retenir pour la phase AVP de la mission de maîtrise d'œuvre l'analyse technique de deux variantes de cote de réhabilitation du barrage de la Lauch avec ou sans réhausse de 3 m.

1.1.4. Objectifs de l'étude d'avant-projet

La présente étude d'avant-projet (AVP) a pour objet la description des solutions techniques suivantes :

- Variante 1 : le confortement du barrage de la Lauch afin de permettre de nouveau son exploitation à la cote de la RN historique, soit 940 m NGF.
- Variante 2 : le confortement du barrage de la Lauch et la réhausse de la crête de l'ouvrage afin d'augmenter la cote de la RN de 3 m, soit 943 m NGF, correspondant à une augmentation de 75% du volume exploitable. Cette augmentation permet de compenser la diminution des débits naturels d'été et d'automne prévue dans le futur.

Avec ou sans réhausse, le barrage une fois conforté répondra aux règles de dimensionnement pour un barrage neuf, ou travaux importants sur un barrage existant de classe A. En effet, bien qu'un déclassement du barrage en classe B au titre de l'article R.214-114 du code de l'Environnement ait été opéré en 2015, le Maître d'Ouvrage souhaite conforter le barrage de la Lauch selon les exigences d'un barrage de classe A, en continuité des études réalisées lorsque le barrage était de classe A démontrant notamment une non-conformité de l'ouvrage et de sa recharge aval dans certains scénarios sismiques.

1.2. CARACTERISTIQUES ACTUELLES DE L'OUVRAGE

1.2.1. Description générale

Le barrage de la Lauch est un ouvrage poids légèrement arqué vers l'amont, situé sur la rivière du même nom. Il a été construit entre 1889 et 1894 par le bureau allemand BUHLER (Berlin) avec uniquement un corps en moellons de pierres maçonnées. Suite à la rupture (en 1895) du barrage vosgien de Bouzey (également barrage-poids maçonné), le barrage de la Lauch est conforté entre 1900 et 1902 par une recharge aval. Les plans de l'ouvrage existant sont fournis en Annexe A.

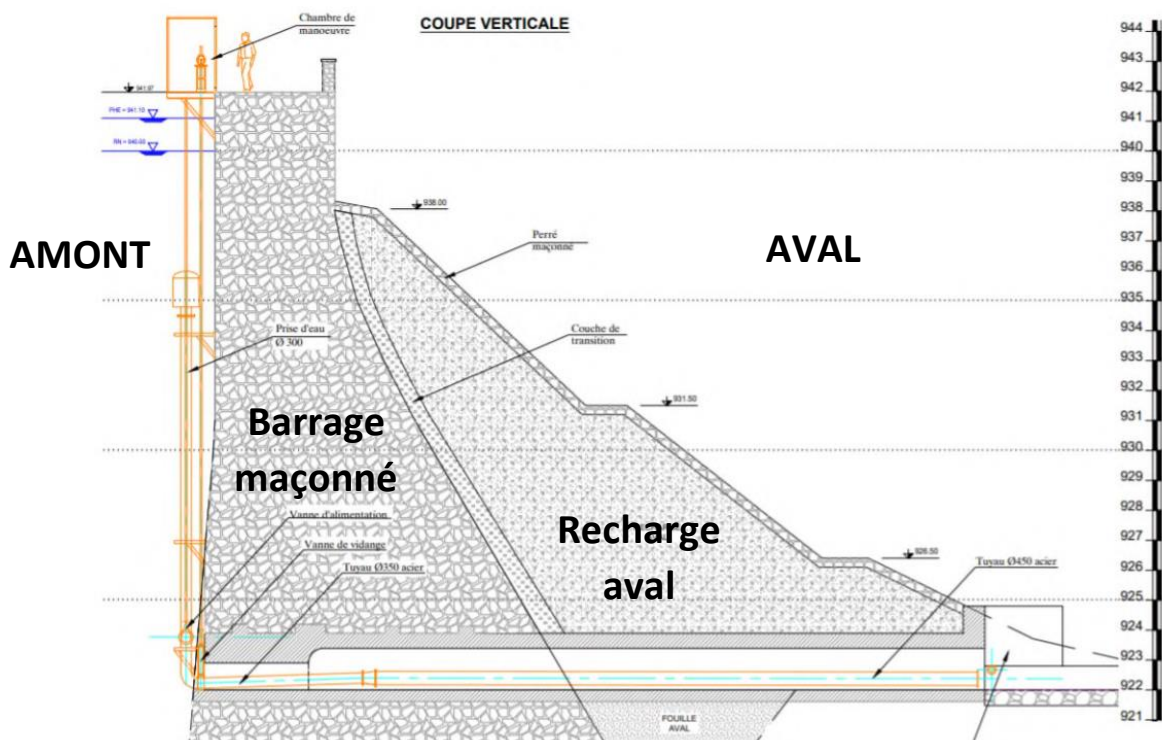


Figure 3 – Coupe du barrage actuel au droit de la vidange de fond

La capacité de la retenue est historiquement de 690 000 m³ à sa retenue normale (RN) à 940 mNGF (cote maximale d’exploitation) et de 771 000 m³ en cote de Plus Hautes Eaux (PHE). Le volume d’exploitation du barrage est fixé à 420 000 m³ depuis sa mise en sécurité face aux désordres observés (voir §1.3) dans l’attente des travaux de confortement.

	Altitude (mNGF)	Capacité (m ³)	Superficie (ha)
Cote de retenue normale (RN)	940.00	690 000	13.8
Cote de retenue normale après mise en sécurité en 2008	937.00	420 000	8.4
Cote de Plus Hautes Eaux (PHE)	941.10	771 000	15.6
Cote minimale d’exploitation	930.00	62 000	1.25

Figure 4 – Volumes réglementaires du barrage de la Lauch

La variante de confortement du barrage de la Lauch avec une rehausse de la cote de RN à 943 m NGF correspondrait à un volume d’exploitation de 1 020 000 m³.

1.2.2. Caractéristiques détaillées

Les caractéristiques principales de l’ouvrage sont les suivantes :

Tableau 1 - Fiche synoptique du barrage de La Lauch

Barrage	
Type	Poids légèrement arqué avec recharge aval
Nature des matériaux	Barrage : parements en parements en blocs de pierres maçonnées dont l'intervalle est rempli d'un mélange de blocs et de mortier Recharge aval : remblai avec une granulométrie continue (max 150 mm) peu ou mal compacté, surmonté d'un perré maçonné
Terrain de fondation	Grauwackes arénites et pour partie des grauwackes fines et schistes
Hauteur maximale au-dessus de la fondation	28.00 m
Longueur développée en crête	250.00 m
Largeur en crête	4.00 m
Largeur maximale au niveau du terrain naturel	12.00 m (maçonnerie) et 25.00 m (maçonnerie + remblai)
Fruit du parement amont	Variable de 0% en partie supérieure à 8.4% en partie inférieure
Fruit du parement aval	Pente du mur en maçonnerie : variable de 0 à 62% Pente aval de la recharge aval en enrochements : 1V/1.16H - 1V/1.27H - 1V/1.33H
Rayon de courbure suivant l'axe de la crête	950.00 m
Altitude de la crête du barrage	942.00 NGF
Altitude du seuil du réservoir (RN initiale)	940.00 NGF
Volume du corps de barrage	7 100 m ³
Hydrologie	
Cours d'eau	La Lauch
Aire du bassin versant naturel	5.57 km ²
Précipitations moyennes annuelles	700 mm/an
Débit annuel moyen de la rivière	0.080 m ³ /s
Ancienneté des relevés de crue	1947
Date de la plus forte crue connue	1983
Débit de la plus forte crue connue	18 m ³ /s

Evacuation des crues	
Seuils latéraux	<ul style="list-style-type: none"> • Crête de 3 seuils déversants calée à la cote 940.00 m NGF et d'un seuil déversant à la cote 937.00 m NGF • Longueur de chaque seuil : 9.40 m • Emplacements : 2 seuils en rive gauche et 2 seuils en rive droite • Débit maximum des évacuateurs de crues : <ul style="list-style-type: none"> ○ 54.3 m³/s sous la cote 941.10 m NGF lorsque les 4 seuils étaient à la cote 940.32 m NGF, ○ supérieur depuis leur abaissement en 2002 puis 2008
Coursier aval	<ul style="list-style-type: none"> • Un coursier en rive droite et un en rive gauche • Largeur du fond des coursiers : 1.60 m à 5.50 m (en crête) • Longueurs des coursiers : environ 110 m • Pente des coursiers : 15 % • Pas de bassin de dissipation au pied du coursier aval. Mur de protection.
Ouvrages de vidange	<ul style="list-style-type: none"> • Pertuis de 0.95 m de hauteur * 0.40 m de largeur débouchant dans la galerie de 1.40*1.40 m² de section (galerie commune à la prise d'eau). • La restitution à la rivière se fait via un canal revêtu de perré maçonné. • Pertuis commandé par une vanne plate de 0.40*0.80 m.
Débit total maximal susceptible d'être évacué	4.30 m ³ /s
Ouvrages de prise d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Pertuis de 0.95 m de hauteur * 0.40 m de largeur débouchant dans une galerie de 1.40*1.40 m² de section • Pertuis commandé par une vanne plate de 0.40*0.80 m à crémaillère • La prise d'eau est constituée de deux conduites de diamètre 300 mm, équipées chacune d'une crépine et d'une vanne. Ces deux conduites se rejoignent en une conduite de diamètre 350 mm qui entre dans la galerie, se connecte sur une conduite de diamètre 450 mm qui traverse la galerie.
Dispositif d'auscultation	
Niveau de retenue	Echelle limnimétrique + une cellule piézométrique
Mesures topographiques	<ul style="list-style-type: none"> • 3 piliers d'observation • Sur le barrage en maçonnerie : 6 cocardes et 11 repères de nivellement, • Sur la recharge aval : 3 cocardes, un spit et 6 repères de nivellement
Mesures piézométriques	<ul style="list-style-type: none"> • 4 piézomètres ouverts verticaux • 3 profils équipés de chambres de mesure : <ul style="list-style-type: none"> ○ au contact maçonnerie/fondation : 3*2 = 6 cellules « amont » et « aval », ○ au cœur du barrage en position amont vers le quart de sa hauteur, 2 cellules, ○ dans la fouille aval du barrage en maçonnerie sous la recharge aval, 2 cellules au contact maçonnerie/fouille.
Mesures de débit de fuite	En rive droite et en rive gauche
Mesures de fissures	3 vinchons à cheval sur le contact (haut du remblai) / parement aval maçonnerie
Mesure du débit sortant	Evacuateurs de crues et vidange de fond
Historique	
Période d'exécution des travaux de construction du barrage	De 1889 à 1894
Date de la première mise en eau	1894

Date des vidanges connues	1896, 1925, 1969, 1998
Nature et date des incidents constatés depuis la première mise en eau	<ul style="list-style-type: none"> • 1894-1896 : Résurgence à travers les fissures en fondation en pied aval du barrage en maçonnerie. • 1947 : Le barrage a surversé sur toute sa longueur.
Nature et date des principales interventions effectuées sur le barrage et ses organes annexes	<ul style="list-style-type: none"> • 1896 : Masque en béton pilonné au pied du mur amont pour stopper les résurgences aval. • 1900-1902 : Construction de la recharge aval. • 1925 : Travaux de rejointoiement du parement amont. • 1955 : Reprise du perré aval de la recharge aval en enrochements. • 1969-1970 : Injection du parement amont du barrage et de la fondation. • 2000-2002 : Mise en place d'un système d'auscultation et abaissement du niveau des seuils à 940.0 m NGF et suppression des batardeaux bois. Travaux d'entretien courant et de remise à niveau du barrage (hors recharge aval). • 2003 : réaménagement du dispositif de drainage et de suivi des résurgences d'eau en rive gauche à l'aval de la recharge • 2008 : Echancrure de seuil d'évacuation en rive droite en vue d'abaisser de 3 m le niveau du plan d'eau.

1.2.3. Historique des travaux

Le barrage a fait l'objet de nombreux travaux d'amélioration et de confortement depuis sa construction, avec notamment :

- La mise en place d'une recharge aval de confortement (remblai doté de trois risbermes et recouvert d'un perré) en 1900-1902, pour pallier un défaut de stabilité globale. La crête de cette recharge aval est à la cote 938.50 m NGF, soit environ 3.50 m sous la crête du barrage (942,05 mNGF). Cette recharge aval prend appui sur la « fouille aval » constituée de matériaux divers non identifiés de remblaiement du pied aval du corps maçonné, suite à l'excavation aménagée pour la construction du barrage ;
- La création d'un masque en béton pilonné en 1896, de nombreux rejointoiements du parement amont (jusqu'en 1927) et l'injection du parement amont sur 1.5 à 2.1 m de profondeur et de la fondation sur 6 m de profondeur (1969-1970), afin de limiter les fuites et infiltrations à travers l'ouvrage et sa fondation ;
- La modification du parement aval de la recharge en 1955 avec le remplacement partiel du perré de pierres sèches par un perré maçonné, afin de traiter les désordres occasionnés par la végétation ;
- Des travaux dans les années 2000-2002 de mise en place de compléments au dispositif automatisé d'auscultation et d'entretien courant suite aux recommandations ISL 1996 :
 - Reprise partielle en maçonnerie de la galerie de vidange (radiers et piédroit),
 - Reprise des radiers des évacuateurs,
 - Réalisation d'un mur de soutènement le long de la route RD430 en rive gauche du barrage,
 - Réalisation de poteaux anti-embâcles devant les déversoirs pertuis,
 - Etanchéité de crête avec enrobés,
 - Reprise par injection et rejointoiement du parement amont en maçonnerie,
 - Travaux de remise à niveau des vannes.
- Des travaux en 2003 de réaménagement du dispositif de drainage et de suivi des résurgences d'eau en rive gauche à l'aval de la recharge
- L'abaissement de 3 m du seuil de l'évacuateur de crues (2008), afin de satisfaire aux règles d'évacuation des crues suite à la révision de l'hydrologie. La cote du seuil du déversoir, auparavant à 940 m NGF, a été abaissée à 937 m NGF.

1.3. PROBLEMATIQUES LIEES A LA RECHARGE AVAL

1.3.1. Désordres et justification de la stabilité

Depuis 1985, des désordres structurels sont observés sur la recharge aval, avec un tassement continu supposé et un décollement irréversible vers l'aval..

De plus, il persiste un doute quant au risque d'érosion de la recharge aval et donc un risque de déstabilisation de l'ouvrage en cas de crue supérieure à la crue centennale.

Par ailleurs, les calculs de stabilité ont montré que le barrage de la Lauch ne répondait pas de manière satisfaisante aux critères requis pour ce type d'ouvrage.

Plusieurs études de diagnostic et réhabilitation menées au cours des années antérieures (et synthétisées dans les chapitres ci-après) ont conduit à prévoir le confortement du barrage par remplacement de sa recharge aval existante en remblais. Différents matériaux de recharge ont été successivement envisagés et la solution finalement retenue est la mise en place d'une recharge en matériau plus raide, de type béton compacté au rouleau (BCR).

Dans l'attente de travaux de confortement, le barrage est exploité partiellement depuis l'arrêté préfectoral du 25 juin 2008 à la cote 937 m NGF (soit 3 mètres en dessous de la cote de RN) et il fait l'objet depuis 2017 d'une procédure de révision spéciale.

1.3.2. Synthèse des études antérieures

1.3.2.1. Expertise 1991 – F. KERN

Suite à l'observation de l'ouverture d'une fissure constatée la première fois en 1985 entre le remblai aval et le parement du barrage, une analyse du comportement et de la sécurité du barrage de la Lauch a été réalisée en 1991 par M. Francis Kern.

L'expertise a montré que les observations topographiques étaient sujettes à caution. Les mesures de nivellement de la crête ont été jugées vraisemblablement erronées et la vérification de la stabilité des bases des mesures avait été préconisée.

Le déplacement observé correspond à un léger glissement du remblai dans son ensemble sur le parement en direction du lit de la Lauch, lié à l'évolution de la fondation en grauwackes et roches métamorphiques, qui diffère de celle du barrage, construit sur un rocher sain. La direction des déplacements sur un plan vertical n'est pas parallèle à la pente moyenne du parement en maçonnerie. M. Francis Kern note dans son rapport un déplacement des repères de référence qui se seraient soulevés par le gel du sol.

Le rapport conclut que les observations sont insuffisantes et les mesures trop peu précises pour expliquer ces déplacements, mais que ceux-ci ne compromettent pas la stabilité du barrage dans la mesure où ces déplacements sont pris en compte dans l'action du remblai sur la maçonnerie.

1.3.2.2. Contre-expertise Coyne et Bellier 1992

Contrairement aux hypothèses émises par M. Francis Kern concernant la qualité des relevés topographiques, le rapport d'expertise rédigé en 1992 par le bureau d'étude Coyne et Bellier indique que les mesures altimétriques paraissent être d'assez bonne qualité compte tenu de la fermeture du cheminement, de l'ordre du millimètre.

Le phénomène constaté serait vraisemblablement causé par le gonflement de la maçonnerie induisant l'augmentation de la cote de la crête du barrage.

A l'instar de l'expertise faite par Francis Kern, le rapport de Coyne et Bellier indique que la recharge est animée d'un mouvement aval vers le bas. La direction du déplacement n'est pas parallèle au parement aval en maçonnerie du barrage, ce qui implique la présence d'une composante horizontale, vraisemblablement à l'origine du décollement du remblai et de l'ouverture de la fissure, de l'ordre de 5 cm.

L'origine de la composante horizontale peut être due à une dégradation de la fondation, ainsi qu'à un glissement horizontal qui accompagnerait le tassement si le coefficient de frottement entre le remblai et le terrain est trop faible.

Par ailleurs, dans le cas où il existerait des vides sous le perré, il n'est pas exclu que celui-ci se désolidarise du remblai sous l'action de son poids et des conditions climatiques sans que ce mouvement ne soit représentatif de celui du remblai.

Le rapport conclut que le comportement du barrage est normal à l'exception du mouvement de la recharge aval assurant le confortement du barrage. La réalisation de quatre tranchées d'investigation est préconisée au niveau des risbermes supérieures et inférieures de manière à suivre le décollement du remblai et celui de perré, et ainsi comprendre les raisons de ce mouvement.

1.3.2.3. Expertise ISL 1996

Dans le cadre des études préalables à la réhabilitation des sept barrages domaniaux du Haut-Rhin, ISL a réalisé en 1996 une nouvelle expertise du barrage de la Lauch et de sa recharge aval.

La fissure observée entre le remblai et la maçonnerie était de l'ordre de 5 cm au centre du barrage et diminuait progressivement sur les bords.

Les résultats des essais pressiométriques réalisés in situ ont mis en évidence que le remblai était peu dense, mal compacté et composé d'un matériau sablo graveleux reposant au moins en partie sur un remplissage de fouille de qualité encore plus médiocre qui pourrait expliquer la fissure en tête et être le signe d'un glissement profond.

Le sondage a mis en évidence un horizon de 5 m d'épaisseur situé sous le niveau du terrain naturel au niveau du pied de la recharge correspondant à la fouille aval, impossible à carotter avec perte totale d'air et présence de bois.

Un puits de reconnaissance, exécuté à la pelle mécanique sur la risberme supérieure du remblai, au niveau de la fissure et sur une profondeur maximale de 1.6 m a permis de mettre en évidence les décollements non superficiels.

En conclusion, le rapport d'ISL jugeait le projet de confortement comme n'étant pas nécessaire au vu des éléments actuels. ISL préconisait à court terme de compléter de dispositif d'auscultation du barrage et de suivre l'évolution des paramètres intrinsèques de l'ouvrage. Cependant, deux éléments pourraient remettre en cause ce jugement, à savoir un glissement profond du remblai aval ainsi qu'une évolution très défavorable de la piézométrie dans le barrage et la fondation.

Plusieurs travaux d'entretien courant ont également été recommandés par ISL à l'issue du rapport pour mettre le barrage de la Lauch à un niveau de sécurité conforme à l'état de l'art :

- Débroussaillage du parement aval et des abords ;
- Traitement de la fissure au sommet du remblai ;
- Adaptation et renforcement du dispositif d'auscultation ;
- Adaptation des évacuateurs et protection contre les embâcles ;
- Réfection de l'étanchéité de la crête et étanchement de la partie supérieure du corps du barrage ;
- Remplacement de la vanne du pertuis rive droite et réparation de la galerie d'évacuation, radier et piédroit.

1.3.2.4. Dossier de révision spéciale SOGREAH 2004

Dans le but de pallier les problèmes rencontrés sur l'ouvrage au niveau de la recharge aval en remblai, un projet de révision spéciale a été engagé en 2003 – 2004. Ce dossier a permis de réaliser des investigations complémentaires sur l'ouvrage et d'étudier sa stabilité sous sollicitations sismiques. Les méthodes de calculs utilisées correspondaient aux pratiques alors en vigueur.

Les investigations ont montré que :

- Le barrage dans son état actuel et sous cas de charge « retenue normale », « plus hautes eaux » ou « vidange » montre des déplacements et des états de contrainte qui sont acceptables pour l'ouvrage ;
- Les déplacements sont importants pour le cas de charge avec séisme maximum à 0.25 g, ils conduisent à la ruine de la recharge aval puis du barrage en maçonnerie. Dans le cas du séisme réduit à 0.125g des désordres importants ont lieu pour la recharge ;
- Dans le cas où la piézométrie en fondation augmenterait, ou dans le cas où le remblai serait saturé suite à de fortes précipitations, la stabilité de la recharge n'est pas assurée. Actuellement, étant donné que le remblai et le perré sont drainants, la stabilité de la recharge est assurée ;
- La qualité du compactage du remblai pilonné de la recharge est de très mauvaise qualité ;
- Le remblai de la fouille aval est de très mauvaise qualité d'un point de vue compactage et hétérogénéité du fait de la présence de cavités internes ;
- La perméabilité de la maçonnerie est hétérogène, bonne à très mauvaise dans le corps du barrage.

Le dossier de révision spéciale concluait que la stabilité de la recharge du barrage de la Lauch devait être considérée comme précaire et qu'un confortement devait être réalisé dans le but de rendre à l'ouvrage un niveau de sécurité acceptable. La solution retenue en premier lieu fut la mise en place d'une recharge aval en alluvions du Rhin.

1.3.2.5. Compléments SOGREAH 2009 – 2010

Après saisie le 4 décembre 2008 de l'ex-CTPB (Comité Technique Permanent des Barrages), devenu désormais CTPBOH (Comité Technique Permanent des Barrages et Ouvrages Hydrauliques), une visite du CTPBOH est effectuée le 16 avril 2009.

Des premiers compléments d'étude sont alors demandés et portent sur :

- Une meilleure caractérisation de l'hydrologie avec revue des débits de crue caractéristiques ;
- Des compléments en matière d'étude de stabilité de l'ouvrage.

Le dossier de révision spéciale de 2004, complété à l'automne 2009, est alors soumis au CTPBOH le 16 mars 2010. Le comité émet :

- Un avis favorable partiel sur le principe de remplacement de la recharge aval ;
- Une demande de compléments d'étude concernant la justification de sécurité vis-à-vis de la crue extrême et du séisme de référence par une analyse dynamique temporelle ;
- une étude complémentaire de stabilité statique et sismique du barrage dans sa configuration temporaire avec une cote RN provisoire à 937.00 m NGF.

1.3.2.6. Étude sismique dynamique SOGREAH 2011 – 2012

L'étude sur le comportement du barrage sous sollicitation sismique dynamique a montré, pour le projet de confortement par une nouvelle recharge aval en alluvions, que :

- La maçonnerie du barrage actuel constitue le point faible de l'aménagement conforté par la recharge aval en alluvions ;
- Les amplifications d'accélération sismique dans le corps de l'ouvrage conduisent à excéder la résistance des matériaux en jeu ;
- La variation du niveau de la retenue et de la crête de la recharge aval en alluvions ne remet pas en cause le constat de défaut de résistance ;
- Pour pallier le phénomène, la maçonnerie du barrage actuel devait présenter une résistance à la traction supérieure à la valeur communément admise au regard de la qualité de la maçonnerie du barrage de la Lauch. Compte tenu des connaissances actuelles sur le matériau de construction de l'ouvrage, cette considération ne peut être admise.

L'étude conclut que la solution de confortement par une nouvelle recharge aval en alluvions du Rhin ne peut pas être une solution retenue pour le barrage de la Lauch.

1.3.2.7. Etude de stabilité - IRSTEA 2019

Le barrage de la Lauch est exploité à la cote 937.00 m NGF depuis 2009, suite à sa mise en sécurité fin 2008 qui a consisté à abaisser l'arase de l'un des pertuis de l'évacuateur de crues à la cote 937.00 m NGF. Cette cote d'exploitation temporaire a été confortée par un arrêté préfectoral du 11 mars 2019.

Pour répondre à la demande du CTPBOH lors de son avis de 2010, l'IRSTEA a réalisé en 2019 pour l'Etat, toujours propriétaire de l'ouvrage, une étude complémentaire, portant sur la stabilité statique et sismique du barrage dans sa configuration actuelle et sous cote d'exploitation temporaire, 937.00 m NGF.

L'étude conclut à la stabilité du barrage de la Lauch à la cote RN 937 mNGF vis-à-vis du séisme de référence pour les barrages de classe B situés en zone de sismicité 3. L'étude montre toutefois que le barrage de la Lauch serait fortement endommagé après l'occurrence d'un tel séisme : la maçonnerie serait plastifiée dans sa zone centrale, et cela s'accompagnerait d'un glissement décimétrique de la recharge mais sans libération non contrôlée de la retenue.

1.3.2.8. Etude ARTELIA 2012 – 2021

Le problème de stabilité de la recharge aval, identifié dans les études de 2003 à 2012, est lié aux points suivants :

- Des pentes aval très fortes oscillant entre 1.16H/1V et 1.33H/1V. Le perré maçonné assure la stabilité de la recharge ;
- Un remblai mal compacté. Ce remblai est un remblai pilonné. Les derniers sondages pressiométriques ont confirmé le fait que ce remblai est mal ou peu compacté ;
- Une fondation du remblai mal compactée. La « fouille aval » du barrage en maçonnerie, qui constitue aujourd'hui la fondation de la recharge aval, est d'après les derniers sondages pressiométriques mal à très mal compactée. De plus certains sondages ont révélé des zones de vide ;
- Un risque lié à la piézométrie. Celle-ci est faible dans le remblai. Toutefois une augmentation de la piézométrie dans la recharge aval remettrait en cause la stabilité de cette dernière ;
- Des défauts de tenue du remblai au séisme et l'incapacité de cette recharge souple à assurer un comportement sismique conforme aux règles actuelles pour le barrage conforté.

Une étude de confortement a donc été réalisée par ARTELIA, anciennement SOGREAH. La solution d'une nouvelle recharge aval en béton compacté au rouleau (BCR) est alors identifiée pour permettre la justification de la stabilité de l'ouvrage pour l'ensemble des critères, après purge de la « fouille aval » présente sous la recharge.

Un dossier technique de type avant-projet a été finalisé en 2021. Il prévoit un confortement du barrage pour une exploitation de la retenue jusqu'à la cote de RN 940 m NGF et constitue à ce titre la base de la variante de confortement « sans réhausse » détaillée ci-après dans le présent rapport.

2. DONNEES D'ENTREES

2.1. TOPOGRAPHIE ET BATHYMETRIE

2.1.1. Données

Aucun document datant de l'époque de la construction n'est disponible. Les levés suivants sont considérés dans la suite de l'étude :

- Levé topographique réalisé en 2021 par SETIS ;
- Levé bathymétrique réalisé en 2022 par SINTEGRA.

2.1.2. Topographie du bassin versant

L'aire d'alimentation du barrage de la Lauch est d'une surface de 5.57 km² et constitue la tête du grand bassin versant de la Lauch qui prend sa source sur le massif vosgien du Markstein et qui s'écoule jusqu'à Colmar. Cette tête de bassin versant est très en relief, en partie en forme de cirque à l'amont du barrage, entourée de plusieurs sommets (Markstein 1268 m, Breitfirst 1280 m).

Les figures ci-dessous permettent d'identifier la topographie du site.

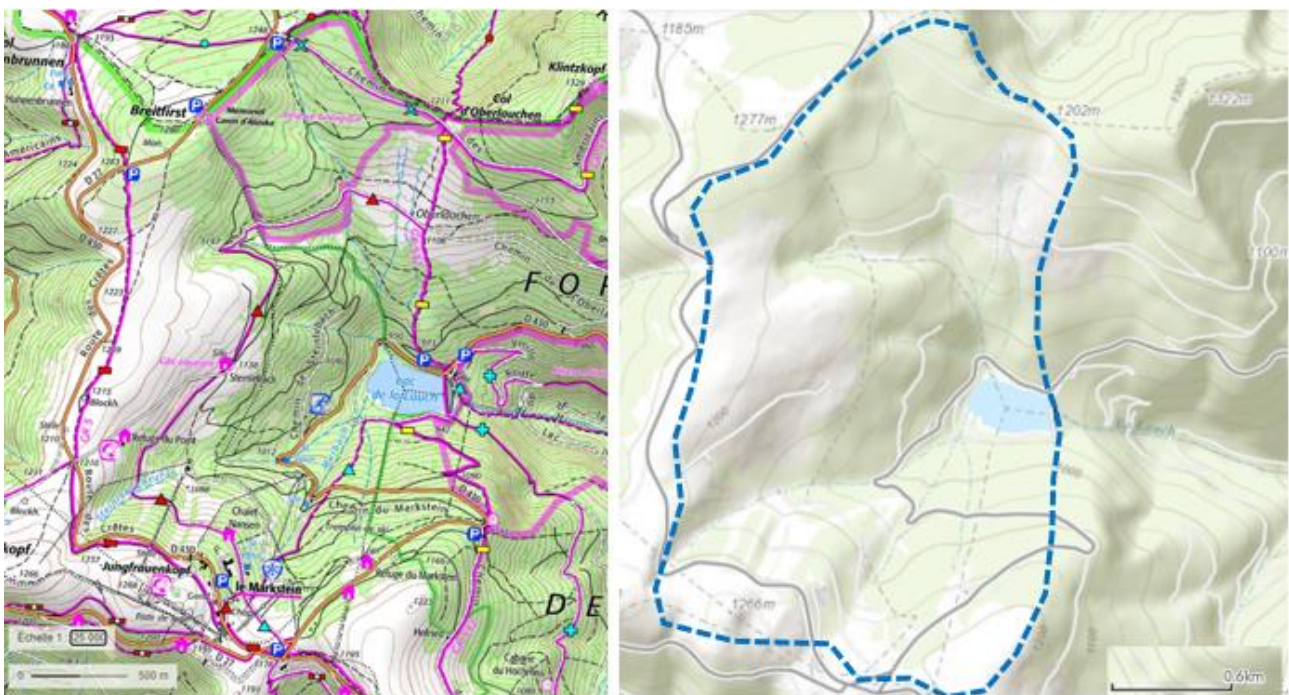


Figure 5 - Topographie du bassin versant du barrage de la Lauch et définition (à dr.) de l'aire d'alimentation du barrage (sources Géoportail et CEA)

La figure ci-dessous illustre l'emplacement du lac de la Lauch par rapport au profil en long de la rivière éponyme. En aval du barrage un dénivelé très marqué est présent avec de nombreuses cascades. La rivière évolue ensuite dans un fond de vallée alluvionnaire (appelé le Florival), avant de se poursuivre son écoulement plus en aval en débouchant sur la plaine d'Alsace à l'aval de Guebwiller jusqu'à Colmar.

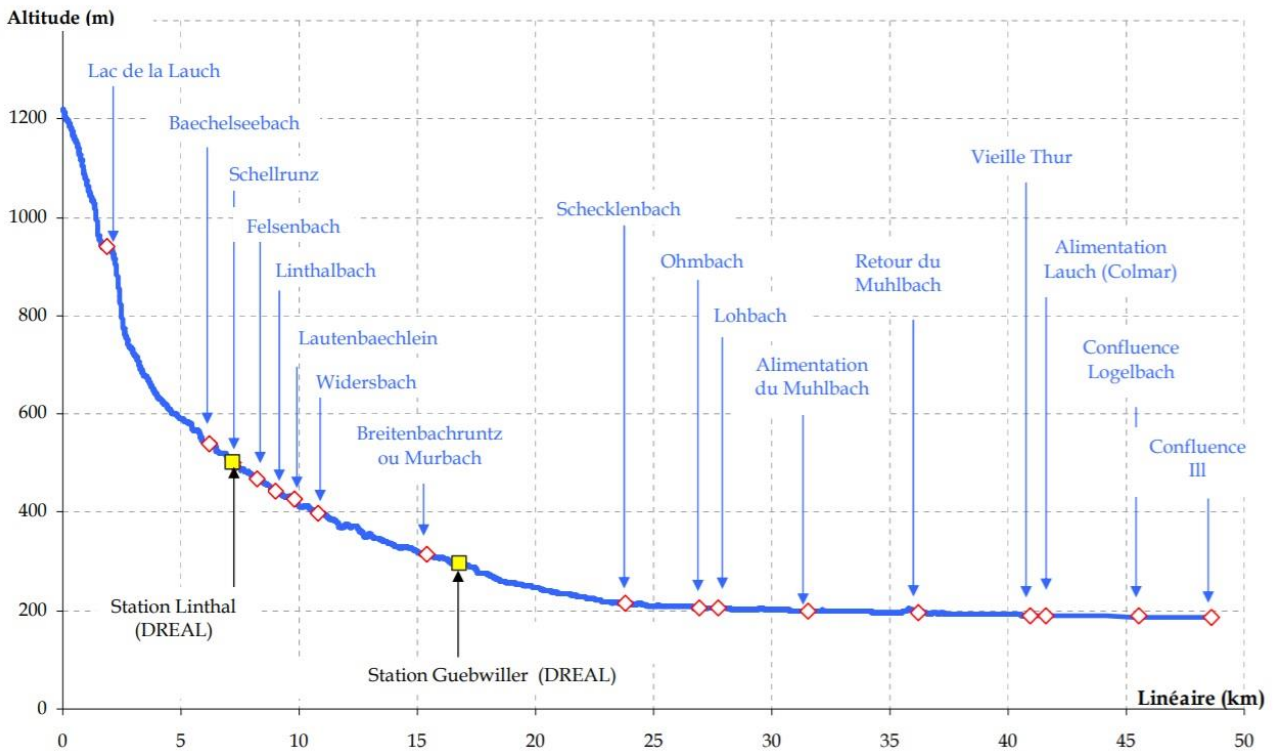


Figure 6 – Profil en long de la rivière Lauch et jonctions avec ses affluents (source CEA)

2.1.3. Bathymétrie et sédiments du lac

Une mesure de la bathymétrie du fond du lac a été réalisée à l'été 2022 depuis une embarcation à l'aide d'une sonde multifaisceaux. Une estimation des sédiments par sondeur multi-fréquences a également été effectuée, estimant un volume de sédiments de l'ordre de 3500 m³ contre l'amont du barrage (zone en rouge sur l'image de droite ci-dessous). La présence d'une digue batardeau à l'amont du barrage (cote crête 927 m) est également constatée.

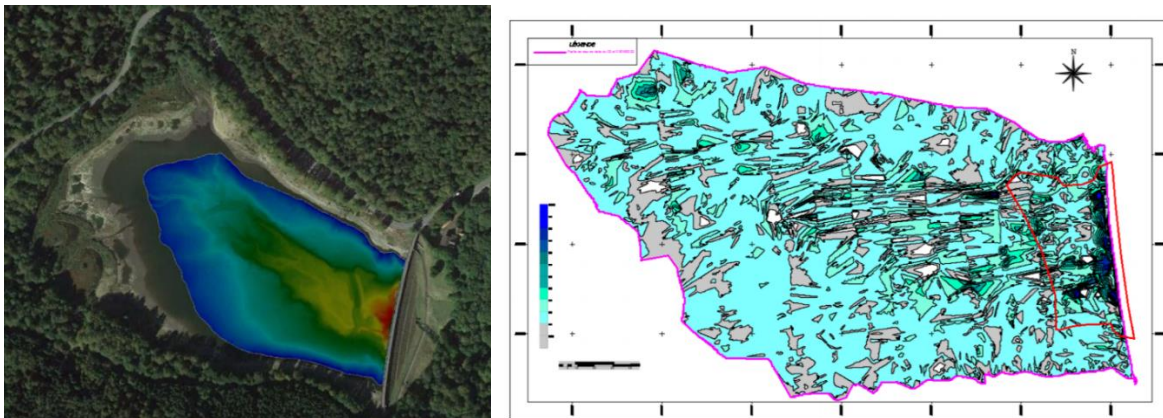


Figure 7 – Illustrations des mesures bathymétriques et sédimentaires (sources CEA)

2.1.4. Lois HSV

Les figures ci-après illustrent l'évolution du volume ou de la surface de la retenue en fonction du niveau altimétrique du réservoir.

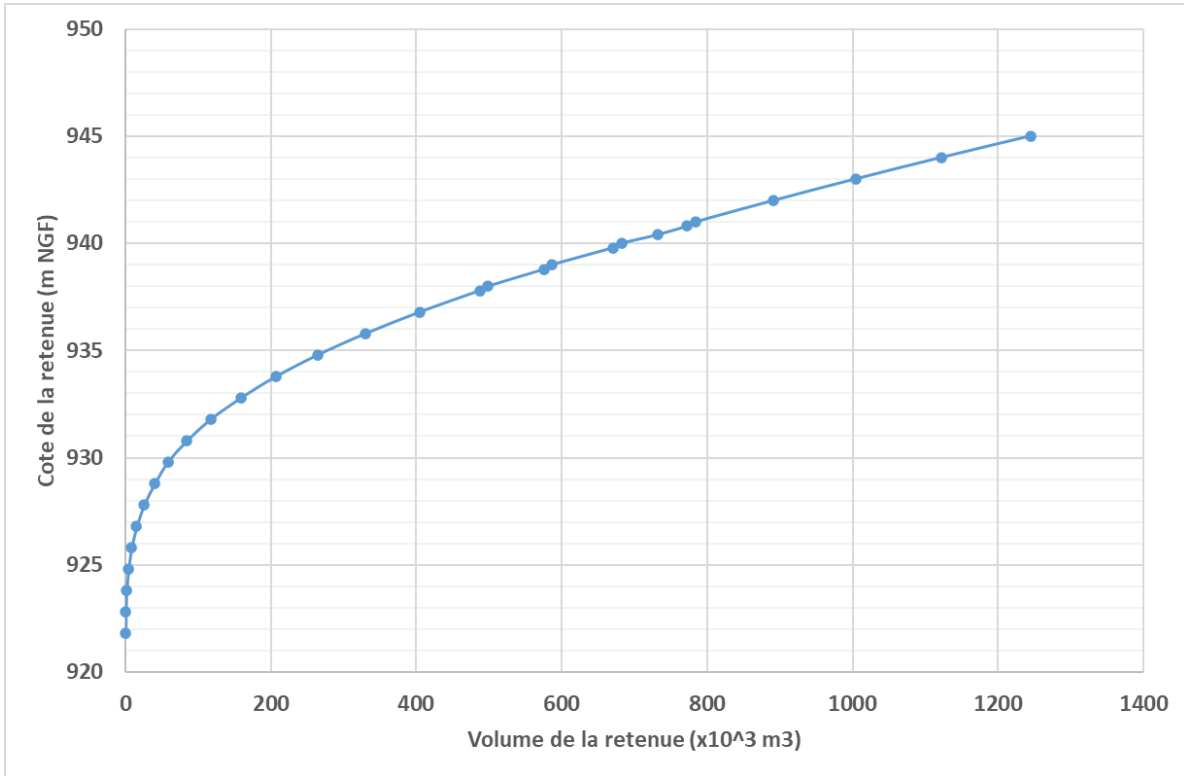


Figure 8 - Courbe Hauteur / Volume

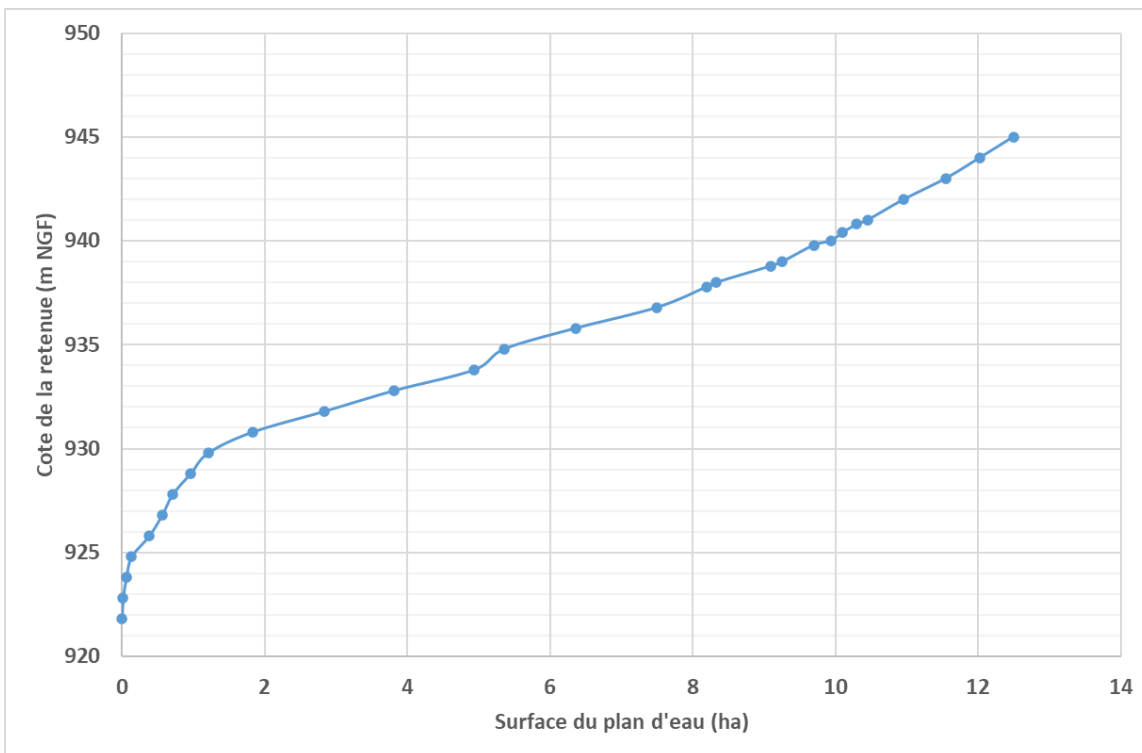


Figure 9 - Courbe Hauteur / Surface

2.2. HYDROLOGIE ET CRUES DE REFERENCE

La dernière révision des études de crue au barrage de la Lauch est l'étude intitulée *Note complémentaire sur l'hydrologie – Estimation de la crue décennale*, préparée en 2009 dans le cadre du dossier de révision spéciale par le Service Aménagement des Rivières de la Direction de l'Environnement et du Cadre de Vie du Conseil Général du Haut-Rhin (CG68).

Cette étude établit, sur la base de la méthode SHYPRE développée par le Cemagref (aujourd'hui INRAE), une estimation du débit de pointe de la crue décennale (Q10 000) égale à 80 m³/s. Cette valeur est depuis reportée dans les documents officiels du barrage, en particulier l'arrêté préfectoral du 11 mars 2019 en vigueur portant autorisation et règlement d'eau du barrage de la Lauch. Cette estimation s'écarte significativement des précédentes estimations (ISL) obtenues par la méthode du Gradex de l'ordre de 57 m³/s.

L'étude de 2009 établit aussi une estimation des débits de pointes pour les crues de période de retour 100 ans et 1 000 ans, respectivement de l'ordre de 20 à 25 m³/s et de 40 à 50 m³/s. On peut souligner que ces estimations sont très supérieures aux résultats de la méthode SHYREG-débits, extension de la méthode SHYPRE, respectivement 9 m³/s et 15 m³/s (<https://shyreg.inrae.fr/>).

Par conséquent, une analyse critique des études hydrologiques de 1995 et 2009 a été réalisée et est présentée en Annexe B.

Cette analyse conclut que :

- En termes d'estimation des pluies maximales : « On observe une assez bonne cohérence globale des pluies maximales estimées entre les méthodes investiguées en 1995, 2009 et aujourd'hui respectivement par ISL, le CG68 et ARTELIA. La pluie décennale s'établirait à ce jour autour de 294 mm sur 24h » ;
- En termes d'estimation de débits maximaux : « Si on écarte l'une des méthodes apportées par cette analyse (SHYREG sur le bassin versant BNVBV), on observe une convergence partielle entre méthodes pour identifier les débits maximaux des crues de périodes de retour moyennes à grandes (10, 100 et 1000 ans) avec cependant des écarts augmentant en fonction de la grandeur de la période de retour.

La méthode du GRADEX actualisée par ARTELIA sur les données de 1989 à 2021 donne des valeurs assez proches (mais restant inférieures) par rapport à la même méthode du GRADEX faite par ISL en 1995.

La méthode SHYPRE régionalisée SHYREG 2022 transposée depuis la station de Lerchenmatt donne des résultats proches de la méthode SHYPRE du CG68 de 2009 pour les débits maximaux sur les périodes de retour 10, 100 et 1000 ans.

Les méthodes historiques GRADEX ISL 1995 et SHYPRE CG68 2009 sont donc a priori toujours valables à ce jour pour les périodes de retour 10, 100 et 1000 ans bien que leurs résultats soient non convergents.

L'ensemble des méthodes applicables donne de même des valeurs différentes pour le débit maximal de la crue extrême (10 000 ans).

Dans la continuité de la logique historique sécuritaire de choix de la capacité nécessaire en crues du déversoir du barrage de la Lauch, il est proposé, pour le dimensionnement des travaux sur le barrage de la Lauch en phase d'avant-projet et suivantes, de conserver le débit de référence actuel qui correspond à la valeur la plus haute donnée par l'ensemble des méthodes, à savoir la valeur de 80 m³/s ».

Compte tenu du type d'évacuateur de crues envisagé, un seuil déversant en crête d'ouvrage et un coursier aménagé sur le parement aval de la recharge en BCR, commun aux deux variantes, le choix du débit de 80m³/s apporte peu de modifications techniques du projet par rapport à un débit de référence plus mesuré.

2.3. NIVEAUX D'EAU

La Maîtrise d'Ouvrage fait le choix conservatif d'une crue projet décennale pour la détermination de la cote des Plus Hautes Eaux (PHE), en lien le débit de référence identifié dans le règlement d'eau en vigueur sur le barrage.

Les niveaux d'eau suivants sont pris en compte :

- Cote de retenue normale (RN) : 940.00 m NGF sans réhausse / 943.00 m NGF avec réhausse ;
- Cote des Plus Hautes Eaux (PHE) : 941.10 m NGF sans réhausse / 944.10 m NGF avec réhausse ;
- Retenue vide (cote 920 m NGF).

Comme expliqué précédemment (§2.2), les Plus Hautes Eaux (PHE) considérées dans l'étude correspondent à une crue décennale (Q10 000) avec un débit de pointe de 80 m³/s (choix conservatif du Maître d'Ouvrage à la fois dans la période de retour considérée ainsi que dans l'estimation du débit de pointe).

Compte tenu des faibles capacités de laminage de la retenue, la cote des PHE est retenue comme égale à la cote de RN + 1.10 m quelle que soit la variante étudiée (avec ou sans réhausse).

En effet, et pour comparaison des ordres de grandeur, le volume de la retenue est de 0.69 Mm³ à la cote 940.00 m NGF et 1.01 Mm³ à la cote 943.00 m NGF tandis que le volume total de la crue décennale est de 1.84 Mm³, soit un ordre de grandeur nettement supérieur aux capacités de stockage de la retenue.

2.4. GEOLOGIE ET GEOTECHNIQUE

2.4.1. Contexte géologique régional

Lors des périodes anté-hercyniennes, le socle gneissique a subi un écaillage avec des chevauchements. A la fin de ces mouvements, les granites anciens se seraient mis en place. Sur ces granites, se sont sédimentés des dépôts d'âge Viséen (carbonifère, 330 millions d'années) qui occupent une grande partie des Vosges du sud. L'étude de ces formations volcano-sédimentaires a permis de reconstituer les grandes lignes de l'évolution de cette région au cours de l'orogénèse alpine :

- Au Viséen inférieur, dans un bassin marin, correspondant à la partie centrale des Vosges du Sud s'accumulaient des sédiments détritiques. A cette sédimentation était associé un volcanisme sous-marin. Plus au Nord, à l'emplacement actuel du Markstein, se déposait une épaisse série détritique, à séquences granoclassées de type flysch (Série de Markstein) ;
- Au Viséen supérieur, les Vosges du Sud sont encore occupées par un bassin marin. Les dépôts correspondants sont actuellement répartis dans une bande incurvée de Giromagny à Thann et Guebwiller. Ces dépôts littoraux composés de passés bréchiés et charbonneux sont associés à un volcanisme essentiellement aérien.

Au Permien, la zone est marquée par une intense érosion transformant la chaîne hercynienne en pénéplaine. Au Trias, les sables fluviatiles, dont la cimentation formera le grès vosgien, recouvrent la quasi-totalité des Vosges. Ensuite et jusqu'à l'Eocène, la région des Vosges a joué un rôle complètement effacé dans l'évolution géologique régionale. C'est essentiellement en contrecoup de l'orogénèse alpine tertiaire que s'individualise le massif vosgien actuel (soulèvement du horst vosgien) avec la formation du fossé rhénan. Durant l'oligocène, le socle hercynien des Vosges est mis à nu puis altéré au Néogène. Au Pliocène, le massif est incisé en larges vallées.

A l'orée de l'ère Quaternaire, le climat se dégrade significativement. La température moyenne annuelle descend d'une dizaine de degrés sous les normales actuelles. Le Nord de l'Europe, et les Alpes se couvrent d'épaisses calottes de glace. Les sommets vosgiens situés au-dessus de 800 m deviennent le domaine des neiges persistantes et des glaciers s'installent.

Sur le versant lorrain des Vosges se développent de grands glaciers comme ceux qui empruntent la haute vallée de la Moselle sur une distance de 40 km. Le versant alsacien, bien plus abrupt, est parsemé de langues glaciaires qui se glissent dans les vallées. Elles restent cantonnées dans les Hautes Vosges (Lauch, Thur, ...).

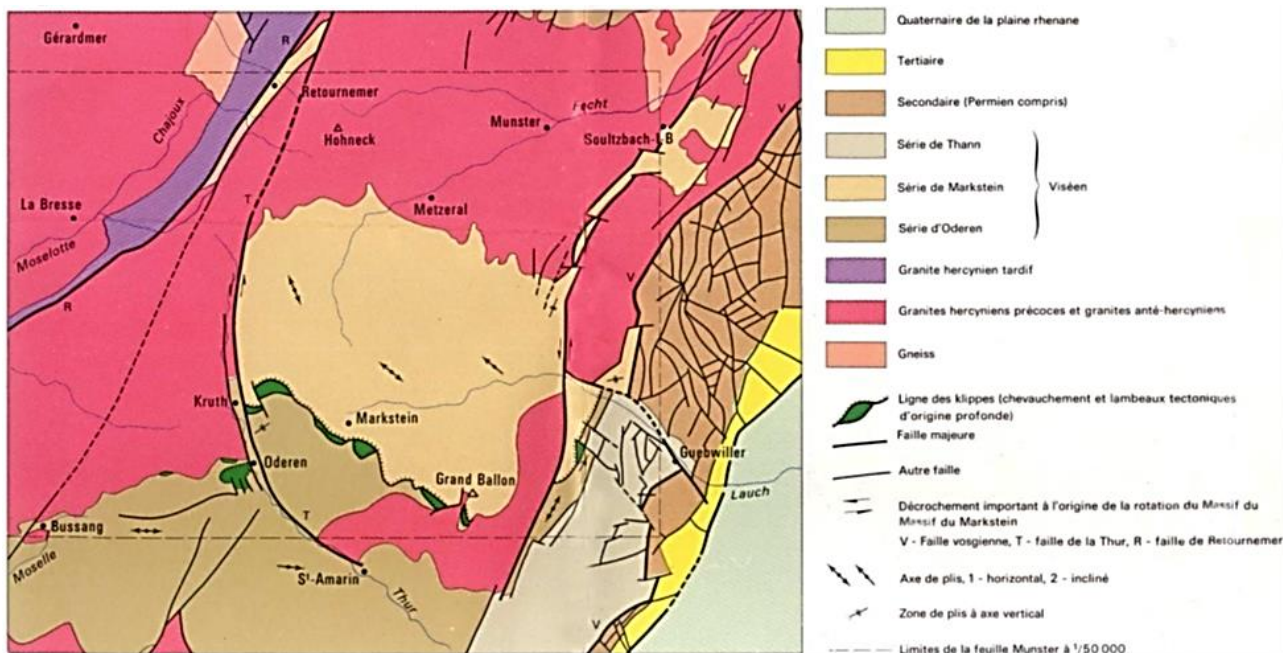


Figure 10 - Contexte géologique régional

Le substratum de la zone est composé globalement de granites hercyniens et antéhercyniens.

On retrouve également dans les Vosges du Sud trois grands ensembles sédimentaires essentiellement composés de grauweekes :

- Série d'Oderen-Bussahg (Viséen inférieur) ;
- Série du Markstein (Viséen indifférencié) ;
- Série de Giromagny-Thann (Viséen supérieur).

A l'Est de la zone étudiée, on note la présence de terrains secondaires et tertiaires fortement fracturés lors de la déformation du fossé rhénan. Ces unités sédimentaires secondaires et tertiaires sont délimitées par deux failles majeures, responsables de l'effondrement du fossé rhénan : la faille vosgienne à l'Ouest et la faille rhénane à l'Est.

Durant la phase alpine, le soulèvement du horst vosgien a atteint son amplitude maximale au niveau du ballon de Guebwiller, formant de nombreuses fractures. Les champs de fracture de la bordure vosgienne orientale sont constitués par une multitude de panneaux, limités par des failles de différentes directions. Ces failles sont à l'origine de la formation du système horst/graben du fossé rhénan.

2.4.2. Contexte géologique local

Le bassin versant du barrage de la Lauch correspond à un ancien cirque glaciaire formé pendant les périodes froides quaternaires. Ainsi, on retrouve généralement au fond du talweg de la Lauch des dépôts d'origine fluvio-glaciaire.

Dans l'environnement immédiat du barrage, les formations rencontrées correspondent à des grauweekes, avec localement la présence de filons de microgranites.

Les grauweekes appartiennent à la série de Markstein, qui contient des bancs de grauweekes-brèches (diamètre supérieur à 2 mm), de grauweekes-arénites (diamètre compris entre 0,62 et 2 mm), et de grauweekes-lutites (diamètre inférieur à 0.62 mm) le plus souvent regroupés en séquences granoclassées. La série à proximité de l'ouvrage est essentiellement sous forme de grauweekes-arénites.

De façon globale, les grauwackes sont des grès de teinte sombre, de dureté élevée, contenant de nombreux fragments d'autres roches, notamment des roches volcaniques. Ces fragments sont souvent anguleux, ce qui suppose une origine proche et un transport rapide. Le ciment est constitué d'une phase détritique riche en chlorite et parfois en particules schisteuses.

Les microgranites présents sous forme de filons à l'intérieur de la série du Markstein apparaissent épais de quelques mètres, parallèles ou perpendiculaires aux principales directions structurales. Ils sont généralement sombres et contiennent environ 10% de minéraux tels que les amphiboles et les pyroxènes.

Au niveau tectonique, seule la direction structurale N135°E (tectonique du viséen supérieur) apparaît nettement dans l'orientation de la plupart des barres dégagées par l'érosion.

Aucun levé de terrain n'ayant été réalisé sur le site, il est difficile d'émettre des hypothèses concernant les directions privilégiées de fracturation des grauwackes. Les seules failles localisées sur la carte géologique concernent les failles globalement orientées N20°E bordant les affleurements de la série de Markstein.

Du point de vue hydrologique, on peut noter la présence d'une source à écoulement pérenne qui témoigne de l'importante fracturation et/ou perméabilité des grauwackes. Le niveau d'altération est fonction du degré de fracturation de la roche. Le profil des grauwackes peut être décrit de la façon suivante, de la surface vers les profondeurs :

- Matériaux meubles d'altération (sables et argiles) ;
- Grauwackes fortement fracturés ;
- Grauwackes peu fracturés.

2.4.3. Géologie au droit de l'ouvrage

2.4.3.1. Description des reconnaissances

L'Annexe A comprend notamment les emplacements des reconnaissances historiques effectuées.

2.4.3.1.1. Reconnaissances entre 1986 et 2000

En 1986, l'entreprise SOLETCO a réalisé 5 forages dans le barrage afin de connaître l'état de la maçonnerie, de son substratum et de la recharge aval en remblai. Des essais d'eau ont été effectués pour évaluer la perméabilité de l'ensemble de l'ouvrage. 4 de ces forages ont par la suite été utilisés en tant que piézomètres.

En 1995, un sondage a été effectué dans le talus aval par SIMECSOL comprenant des essais pressiométriques et une analyse granulométrique du matériau aval.

En 1996, l'entreprise FONDASOL a également mené une campagne de reconnaissance du sol de fondation dans le cadre de l'étude ISL.

Une nouvelle campagne de sondage a été réalisée en 2000 par SCETAUROUTE par forages carottés : 9 forages équipés par la suite de cellule de mesure de pression interstitielle, entre 2000 et 2002.

Les résultats de ces reconnaissances sont résumés dans les tableaux suivants :

Nom du sondage	Profil central 3-3				
	S2	SP2	S4	SP4	SP8
Hauteur du sondage [m]	29.10	28.30	19.00	18.80	17.20
Hauteur dans le rocher [m]	2.65	2.00	2.10	1.80	1.90
Rock Quality Designation (RQD)	90%	10%	30%	15%	0 à 35%
Perméabilité	3 UL	0 UL	-	4 UL	-
Qualité du rocher	Bon	Très fracturé	Fracturé	Très fracturé	Altéré et fracturé

Nom du sondage	Profil rive gauche 2-2	
	SP6	SP7
Hauteur du sondage [m]	20.00	26.70
Hauteur dans le rocher [m]	1.65	2.90
Rock Quality Designation (RQD)	0 à 70%	66%
Perméabilité	8 UL	0 UL
Qualité du rocher	Très fracturé (20 cm) à peu fracturé	Très fracturé (1,00 m) à fracturé

Nom du sondage	Profil rive droite 1-1				
	SP1	SP3	SP9	S1	S3
Hauteur du sondage [m]	28.00	17.50	17.35	28.70	17.30
Hauteur dans le rocher [m]	1.85	2.00	2.10	3.25	2.20
Rock Quality Designation (RQD)	0%	22%	0 à 19%	40%	90%
Perméabilité	0 UL	20 UL	-	10 UL	19 UL
Qualité du rocher	Fracturé	Fracturé	Fracturé	Fracturé	Fracturé

On retient de ces campagnes que le rocher de fondation est :

- Très fracturé à fracturé, avec un RQD moyen de 40% (valeurs comprises entre 0 et 90%) ;
- Peu à moyennement perméable, avec une moyenne de 7 UL (valeurs comprises entre 0 et 20 UL).

2.4.3.1.2. Reconnaissances GEOTECH 2003

La campagne de 2003 réalisée par GEOTECH avait pour but de définir les caractéristiques du terrain sous la recharge aval, dite fouille aval, ainsi que la fondation en aval de cette recharge.

- 7 forages destructifs dont 4 ayant permis la réalisation d'essais pressiométriques ;
- 5 sondages carottés ;

Des échantillons ont également été prélevés dans la recharge afin de réaliser des essais de teneur en eau, une analyse granulométrique et vérifier la présence de matière organique.

Les résultats de la reconnaissance sont décrits dans les tableaux ci-dessous :

Nom du sondage		Résumé des sondages carottés				
		SC1	SC4	SC6	SC7	SC8
Profondeur du sondage [m]		4.00	4.60	4.80	3.50	12.00
Fouille aval [m]		2.00	2.60	3.80	2.50	8.00
Rocher de fondation	Epaisseur [m]	2.00	2.00	1.00	1.00	4.00
	Cote [m NGF]	920.1 à 918.1	922.95 à 920.95	922.7 à 921.7	923.35 à 922.35	918.55 à 914.55
	RQD	0	0	0	50%	0
	Description	Roche grise très fracturée	Roche grise très fracturée	Roche grise très fracturée	Roche grise peu fracturée	Roche grise fracturée
	Qualité du rocher	Très mauvaise	Très mauvaise	Très mauvaise	Bonne	Très mauvaise
Niveau d'eau		920.00	Pas d'eau	Pas d'eau	922.83	917.75

Nom du sondage		Résumé des essais pressiométriques			
		SP2	SP3	SP6	SP7
Profondeur du sondage [m]		6.50	13.50	7.00	3.00
Fouille aval	Epaisseur [m]	2.40	7.50	3.80	2.50
	Module pressiométrique [MPa]	6.00 à 9.40	6.70 à 53.80	34.70 à 36.60	6.10
Rocher de fondation	Epaisseur [m]	2.80	5.10	3.20	0.50
	Cote [m NGF]	923.8 à 921	915.65 à 910.55	922.2 à 919	923.40 à 922.90
	Description	Roche grise	Roche grise très fracturée à saine (sur 2.70 m)	Roche grise	Roche grise
	Qualité du rocher	Très mauvaise	Très mauvaise à bonne	Bonne	Bonne
Niveau d'eau [m NGF]		922.1	919.50	921.15	Pas d'eau

Les forages destructifs en pied de recharge SD01 et SD04 indique un toit rocheux entre 2.5 et 3.0 m de profondeur. Le sondage destructif le plus à l'aval SD05 indique une profondeur de rocher à 0,5 m.

On retient de cette reconnaissance que la fouille dans la zone de pied aval de la recharge est :

- Très fracturée à fracturée, avec un RQD moyen de 10% (valeurs comprises entre 0 et 50%) ;
- La fouille aval est mal compactée, avec un module pressiométrique moyen de 20 MPa.

2.4.3.1.3. Reconnaissances géophysiques IMSRN 2006

Une campagne de reconnaissances géologiques et géophysiques a été réalisée par l'Ingénierie des Mouvements de Sol et des Risques Naturels (IMSRN) en 2006.

Cette campagne a consisté en la réalisation de :

- 5 profils de sismique réfraction de 235 m chacun ;
- 5 profils de mesure de la résistivité de la fondation par panneaux électriques de 315 m chacun.

Ces profils ont été réalisés en rives gauche et droite, ainsi qu'à l'aval du barrage.

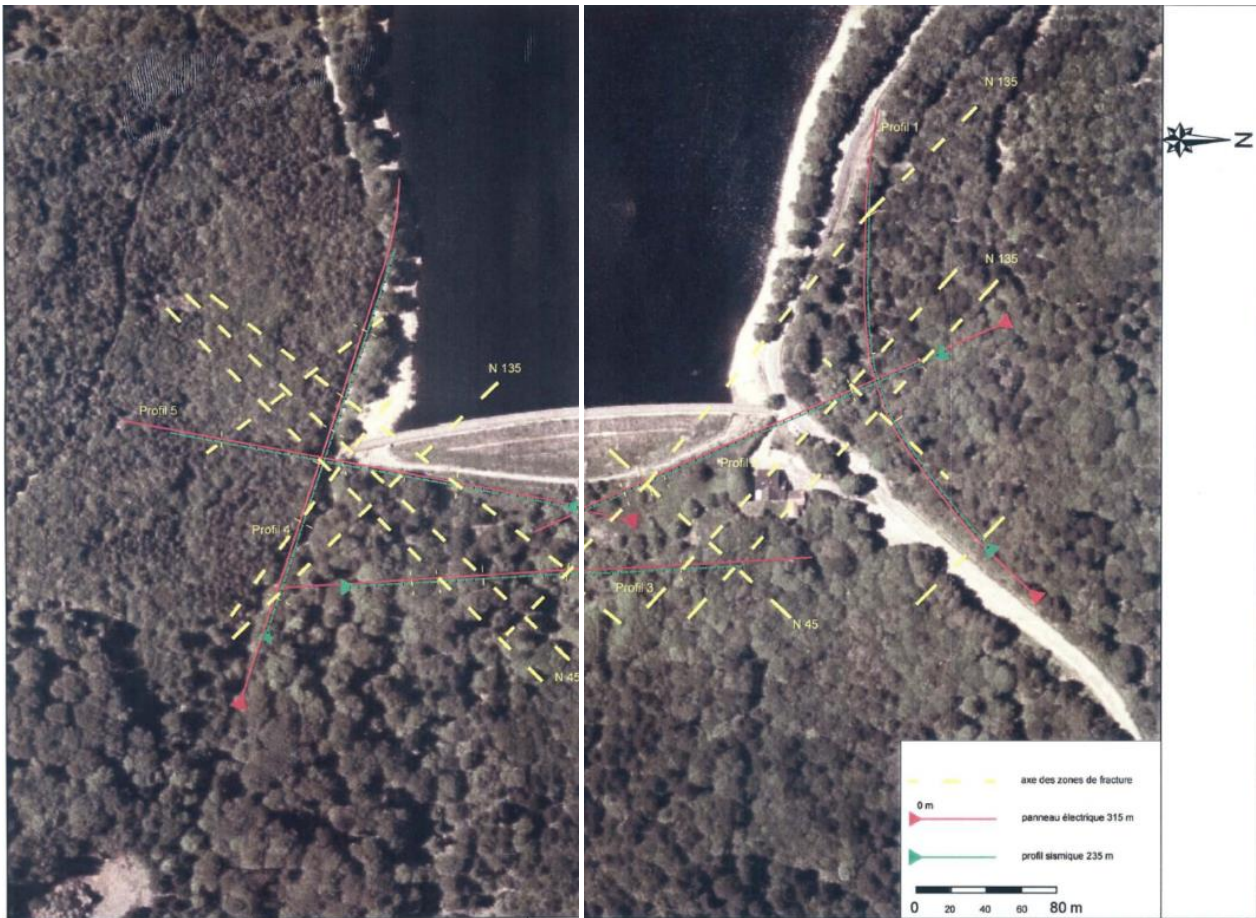


Figure 11 - Implantation des reconnaissances IMSRN 2006

Cette campagne a permis de mettre en évidence la profondeur du rocher de fondation d'une rive à l'autre du barrage, allant du rocher sub-affleurant au terrain naturel à la présence de plusieurs dizaines de mètres de terrain meuble. Les profils retenus pour la présente étude sont ceux définis en vert sur la figure ci-après. Les profils de sismique réfraction y sont également représentés et le toit de l'horizon rocheux est délimité en rouge.

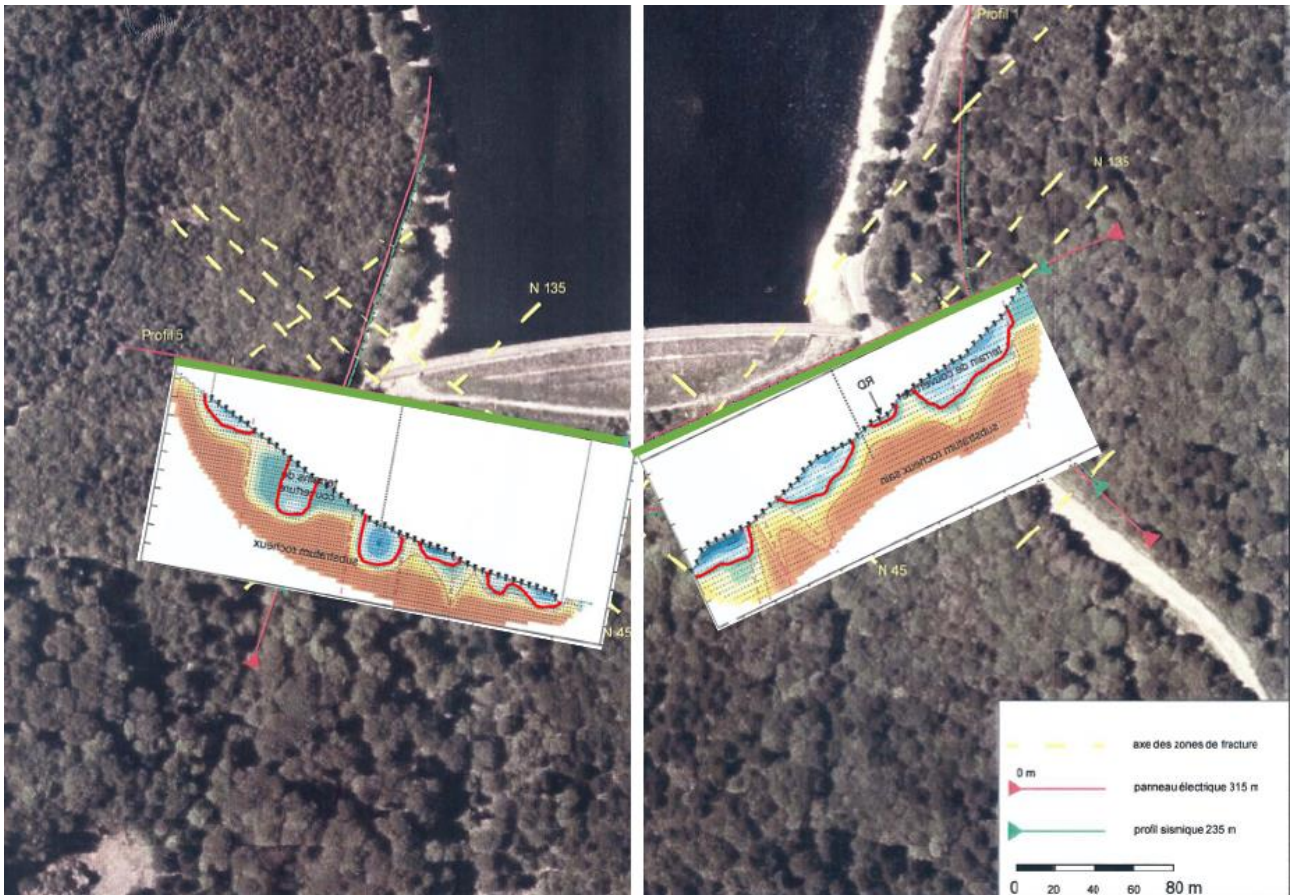


Figure 12 - Profils de sismique réfraction considéré pour la détermination du toit du substratum rocheux

Dans le cadre de la présente étude d'AVP, l'hypothèse a été faite que la position du toit rocheux ne variait pas de l'amont à l'aval sous l'emprise du barrage et de sa recharge. Ainsi, les niveaux de toit rocheux issus des résultats des études géophysiques présentés à la figure précédente ont été extrudés dans la direction aval-amont et recalés ponctuellement par les informations issues des forages. La position du toit rocheux sous le barrage devra toutefois être confirmée en phase suivante (PRO) par le biais de reconnaissances complémentaires détaillées au § Erreur ! Source du renvoi introuvable.. Il est à noter qu'à ce stade la présence d'un éperon rocheux en rive droite est soupçonné et fait l'objet d'investigations spécifiques.

2.4.3.2. Description lithologique des terrains

Les différentes campagnes de reconnaissance effectuées sous le barrage de la Lauch ont permis de mettre en évidence les types de terrains suivants :

- Des grauwackes, roches cristallines grises dures mais globalement très fracturées sous le barrage en maçonnerie, avec une perméabilité faible à moyenne ;
- Une fouille aval constituée de remblai d'argile graveleuse ou de sables argilo-graveleux, avec des blocs rocheux jusqu'à une profondeur variant de 0.40 à 8.00 m selon les sondages ;
- Des grauwackes durs mais très fracturés sous la recharge aval et sous les couches de terrain naturel et d'altération en aval de la recharge.

2.4.3.3. Stabilité des fondations et appuis

2.4.3.3.1. Barrage et remblai

Les reconnaissances et observations effectuées permettent d'établir un premier diagnostic quant à la stabilité de la fondation de l'ouvrage, et des caractéristiques qui pourront être retenues pour les calculs.

La stabilité naturelle des appuis des ouvrages semble satisfaisante, et aucun signe d'alerte n'a été observé depuis la création du barrage.

Il n'y a pas de cheminement d'eau préférentiel révélant une altération de la fondation qui soit apparu depuis la construction du barrage. La faible piézométrie dans le remblai aval, qui s'établit de 1.00 à 2.00 m environ sous le terrain naturel, confirme ces observations.

La structure du massif rocheux et ses caractéristiques géomécaniques, même si elles ne sont pas particulièrement favorables du fait du rocher fracturé, sont néanmoins suffisantes pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

La recharge est en grande partie fondée sur le remblai de la fouille aval. Ce remblai est mal ou peu compacté.

La caractérisation des paramètres mécaniques des grauwackes selon la méthode de Hoek & Brown est donnée en Annexe C.

Les caractéristiques retenues des matériaux de fondation sous le barrage en maçonnerie et de la fouille aval sous le remblai sont présentées ci-dessous :

	Description du terrain	GSI (classification Hoek & Brown)	Rock mass strength
Rocher sous le barrage en maçonnerie	<ul style="list-style-type: none">• Peu fracturé à fracturé• UCS = 25 à 50 MPa• $m_i = 17$ pour du grauwackes	35	<ul style="list-style-type: none">• $c = 1.51$ à 0.74 MPa• $\phi = 44^\circ$ à 41°• $E = 7.4$ à 2.8 GPa
Fouille aval	<ul style="list-style-type: none">• $E_{moyen} = 20$ MPa		<ul style="list-style-type: none">• $c = 10$ kPa• $\phi = 36^\circ$• $E = 20$ MPa

2.4.3.3.2. Etanchéité de la cuvette

Le type de géologie du site n'est pas propice à l'apparition de problèmes d'étanchéité. Seule une fuite en rive gauche a été observée entre la fondation et le barrage dès sa construction. Un écoulement est également mesuré et suivi en rive gauche à l'aval du barrage.

2.4.3.3.3. Stabilité des rives

Les pentes des rives de la Lauch sont faibles et boisées, ce qui réduit les risques de glissement des talus. La dernière vidange de 1998 a permis de vérifier que la stabilité des rives est assurée même pour les cas de fonctionnement exceptionnel. Aucun signe d'alerte n'a été identifié depuis plus d'un siècle d'existence.

2.5. ESSAIS SUR SITE ET EN LABORATOIRE

2.5.1. Fondation rocheuse sous la maçonnerie

Les mesures en laboratoire réalisées par Scetauroute en 2000 ont permis de déterminer un poids volumique humide du rocher sous maçonnerie égal à 27.80 kN/m³.

2.5.2. Fouille aval

Les essais effectués en laboratoire sur la fouille aval ont conduit aux caractéristiques suivantes :

- Teneur en eau : variable de 16 à 26 % ;
- Granulométrie :
 - Dmax = 95 mm,
 - % minimum de passant à 80 µm > 11.5 %,
 - % passant à 50 mm > 76%.
- Teneur en matières organiques maximale : 6.23 %

2.5.3. Maçonnerie

2.5.3.1. Essais Lugeon

Les résultats des essais Lugeon réalisés dans la maçonnerie pendant la campagne SOLETCO de 1986) sont résumés ci-dessous (1 Unité Lugeon (UL) = 1 l/min/m sous 1MPa de pression) :

Forages	Tranche testée	Absorption [UL]
S1	0 à 7.4 m	10 à 28
	7.4 à 25.45 m	0.5 à 6
S2	0 à 10.5 m	6 à 10
	10 à 26.45 m	0.5 à 4
S3	9.60 à 15.10 m	22 à 42
S4	9.50 et 13.50 m	50

Les forages verticaux S1 et S2 sont situés dans la partie amont du corps de maçonnerie du barrage. Les forages verticaux S3 et S4 sont situés en aval respectif des forages S1 et S2 (pour établir deux profils de comparaison) en pied aval du corps de maçonnerie.

Les données du tableau ci-avant peuvent être ainsi interprétées :

- Dans les sondages S1 et S2, les absorptions sont relativement élevées en surface (6 à 28 UL entre 0 et 8m), et toujours faibles en profondeur (0.5 à 6 UL).
- Dans les sondages S3 et S4, les essais Lugeon ont été conduits uniquement dans la maçonnerie et les valeurs sont fortes (entre 20 et 50 UL).

2.5.3.2. Essais en laboratoire

Les informations concernant la maçonnerie sont celles tirées des sondages de 1986 et 1996. Le barrage est constitué de deux murs en blocs de pierres maçonnées dont l'intervalle est rempli d'un mélange de blocs et de mortier. L'ensemble des moellons est en grauwacke. D'après les photos des carottes de sondage, le mortier est constitué de sable relativement grossier. Le mortier est vraisemblablement un mélange de sable, de chaux et de ciment. Les forages ont permis de montrer que :

- Les moellons sont peu altérés (présence de quelques caries) ;
- Les décollements entre mortier et moellons sont rares ;
- Il y a présence de mortier friable et vacuaire en des zones localisées.

Lors de la campagne géotechnique réalisée en 1996 par SCETAUROUTE, des échantillons de mortier et de blocs provenant des sondages SP1 et SP2 ont été analysés. Les caractéristiques de densité suivantes ont été trouvées :

- Poids volumique sec du mortier 19.2 kN/m³ ;
- Poids volumique humide du mortier 21.3 kN/ m³ ;
- Poids volumique humide du rocher 27.8 kN/m³ ;

La proportion de mortier et de blocs n'a pas été étudiée en laboratoire. Cependant, on pourrait retenir un pourcentage moyen de 50% de mortier et de 50% de blocs, qui conduisent à un poids volumique humide de maçonnerie de 24.5 kN/m³. Une valeur sécuritaire de 24 kN/m³ est retenue pour les calculs.

2.5.4. Recharge aval

2.5.4.1. Structure générale

Les études ont permis de mettre en évidence que la recharge aval est constituée de trois couches :

- Une couche de surface : le remblai est recouvert d'un perré maçonné constitué de gros blocs. Une épaisseur approximative de 0,50 m peut être retenue. Les blocs utilisés sont en grauwacke ;
- Le cœur de la recharge est constitué d'un matériau comprenant des petits blocs, cailloux et morceaux de grauwacke comportant peu d'éléments fins selon SOLETCO. Selon SIMECSOL et SCETAUROUTE, il s'agit d'un ensemble de galets, graviers (2 à 15 cm) avec ou sans une gangue limono-argileuse. Des prélèvements ont été effectués par SIMECSOL en 1995 dans le haut de la recharge et des analyses granulométriques ainsi que des densités et teneur en eau ont été réalisées ;
- Couche drainante : Celle-ci n'a pas été détectée dans les sondages S3, S4 et S5. Cependant dans le sondage S5, le matériau situé à la base du remblai présente une granulométrie moins grossière et plus régulière.

2.5.4.2. Nature des matériaux

Les résultats des différents essais réalisés dans le cœur de la recharge sont rappelés ci-dessous :

- Trois analyses granulométriques ont été réalisées. Elles montrent un matériau avec un d50 compris entre 5 et 10 mm, un pourcentage de fines (diamètre inférieur à 80 μm) entre 3 et 11% ;

- Trois essais de teneur en eau ont été conduits ; cette teneur en eau est variable et comprise entre 6 et 16% ;
- Lors de la réalisation des sondages en 1986, les pertes d'eau étaient totales dans le remblai.

2.5.4.3. Caractéristiques mécaniques

Les essais pressiométriques réalisés dans le sondage I ont donné les résultats suivants :

- Des pressions limites faibles ou très faibles comprises entre 0.1 et 0.90 MPa ;
- Des modules pressiométriques faibles, tous inférieurs à 8 MPa. Le module pressiométrique moyen est d'environ 4MPa. On pourra retenir un module $E = 3 \cdot E_m = 12 \text{ MPa}$;
- Les reconnaissances et la nature du matériau conduisent à estimer un angle de frottement d'au plus 40°. En effet, la stabilité de la recharge semble être limite et due à la couche de surface (perré) ; la pente maximum de 1V/1.16H donne un angle de frottement de 40.8°. Pour des moraines, un angle de frottement de 36° est normalement considéré. On retiendra pour les calculs un angle de frottement de 36°.

En conclusion, le remblai stabilisateur est constitué d'un matériau sablo-graveleux, peu dense et mal compacté, reposant au moins en partie sur un remplissage de fouille aval d'encore plus mauvaise qualité. Ceci est illustré par les sondages I et SP4 qui montrent des vides dans la partie recharge des fouilles aval au TN.

Les valeurs de RQD montrent que lors de la construction du barrage, la couche de rocher de qualité très faible, que nous retrouvons à l'aval du barrage en maçonnerie, a été excavée sous le barrage pour atteindre la couche de rocher ayant une qualité moyenne à faible.

2.6. CARACTERISTIQUES MECANIQUES RETENUES

Les caractéristiques des matériaux et interfaces retenues pour le dimensionnement sont décrites ci-après. Celles-ci sont établies sur la base des reconnaissances et essais en laboratoires, ainsi que sur les données issues de la littérature et d'expériences similaires. Les caractéristiques des interfaces sont établies sur la base des paramètres de résistance les plus faibles des deux matériaux en contact, avec une première approche pessimiste négligeant la cohésion.

Tableau 2 – Caractéristiques mécaniques des matériaux

Matériaux	Poids volumique (kg/m3)	Module de Young (MPa)	Angle de frottement (°)	Cohésion (kPa)
Grauwackes peu fracturés	2 700	7 400	44	1 510
Grauwackes fracturés	2 700	2 800	41	740
Fouille aval	2 000	20	36	10
Maçonnerie	2 400	10 000	45	1 000
Recharge aval existante	2 000	20	36	10
Recharge aval future en BCR	2 400	20 000	45	/

Nota : les caractéristiques de la recharge aval et de la fouille aval sont données à titre indicatif. La stabilité de l'ouvrage dans la situation actuelle n'est pas ré-étudiée dans le présent document. Dans le projet de confortement, l'intégralité de la recharge actuelle sera déposée et la fouille aval sera décapée.

Tableau 3 – Caractéristiques mécaniques des interfaces

Interface	Angle de frottement (°)	Cohésion (kPa)
Maçonnerie / rocher de fondation	41	0
Recharge aval en BCR / rocher de fondation	41	0
Maçonnerie / recharge aval en BCR	45	0

2.7. SISMICITE DU SITE

D’après la carte de l’aléa sismique de la France éditée par le Ministère de l’Ecologie, de l’Energie, du Développement durable et de l’Aménagement du territoire, le barrage de la Lauch est situé en zone d’aléa sismique modéré, ce qui correspond à la zone de sismicité 3. Des valeurs forfaitaires d’accélération sismiques sont proposées :

- Pour un barrage de classe A (applicable au barrage de la Lauch jusqu’en 2015), l’accélération horizontale à considérer est de 0.24 g ;
- Pour un barrage de classe B, l’accélération horizontale à prendre en compte est 0.16 g.

L’étude sismique 2005 du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) indique les mouvements sismiques de référence à prendre en compte pour le dimensionnement de l’ouvrage. Deux sources sismiques, proches et lointaines, ont été distinguées pour établir les spectres normalisés correspondants :

- LaLauch_SMSProche est le spectre normalisé du séisme issu d’une source proche du site du barrage de la Lauch selon l’étude du BRGM ;
- LaLauch_SMSLointain est le spectre normalisé du séisme issu d’une source lointaine du site du barrage de la Lauch selon l’étude du BRGM.

Par ailleurs, selon le groupe de travail « barrages et séismes », et dans un souci de cohérence avec les valeurs forfaitaires, les valeurs d’accélération et le niveau maximal du spectre pris en compte ne peuvent être inférieurs, pour les ouvrages situés en zone de sismicité $n = 2$ à 4, aux valeurs forfaitaires associées à la même nature de sol de la zone de sismicité $n-1$. D’où la nécessité d’établir les spectres suivants pour la comparaison :

- EC8_BarrageA_Z2A est le spectre normalisé du séisme de référence forfaitaire pour un barrage de classe A situé dans une zone de sismicité 2 (soit la zone de sismicité $n-1$ pour le barrage de la Lauch) ;
- EC8_BarrageA_Z3A est le spectre normalisé du séisme de référence forfaitaire pour un barrage de classe A situé dans une zone de sismicité 3.

La comparaison a montré d’une part que le spectre de LaLauch_SMSLointain donnait des accélérations inférieures à celles du spectre de EC8_BarrageA_Z2A et ne respectait donc pas la condition du groupe de travail « barrage et séisme ».

D’autre part, le spectre de LaLauch_SMSProche donne des accélérations inférieures à celles du spectre de EC8_BarrageA_Z2A, excepté pour la gamme de période située entre 0.1 et 0.7 secondes.

Conformément aux recommandations du groupe de travail « barrage et séisme », le spectre **EC8_BarrageA_Z3A** a été utilisé pour les calculs sismiques de l’étude 2012. Ce spectre est conservatif par rapport à celui issu de l’application de l’arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages.

Le Maître d’Ouvrage souhaite conserver ces données d’entrées, conduisant à un dimensionnement qui présente en conséquence des marges de sécurité supérieures à celles des exigences de sécurité requises.

Les spectres des séismes caractéristiques utilisés pour l’étude sismique sont présentés ci-dessous :

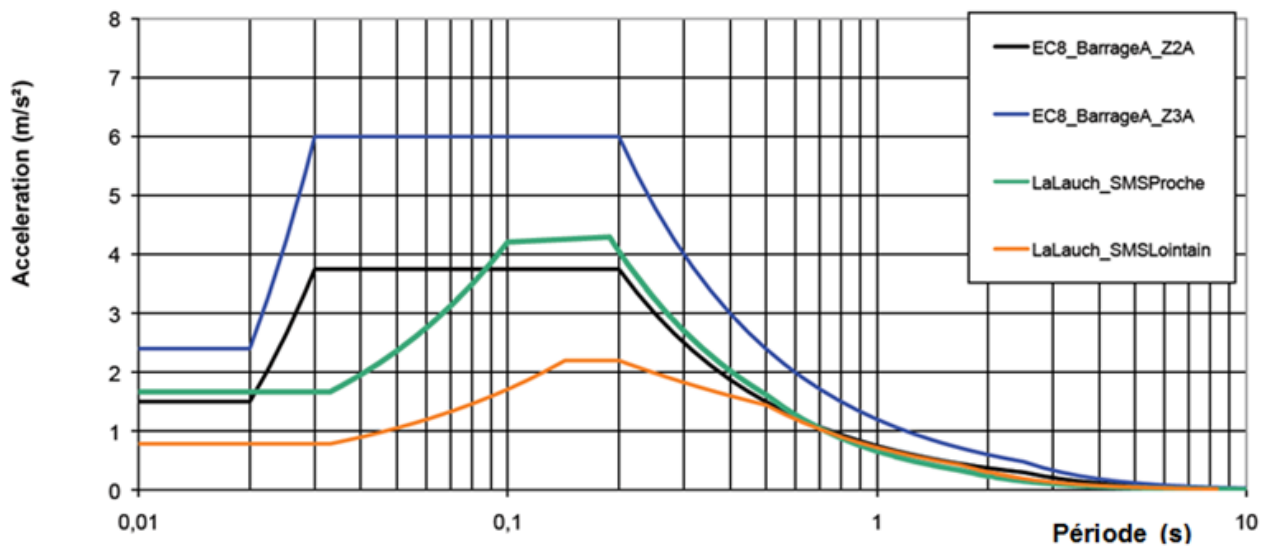


Figure 13 - Spectre des séismes caractéristiques

3. CRITERES DE CONCEPTION

3.1. DIMENSIONNEMENT DU BARRAGE

La justification de la stabilité du barrage est menée suivant les « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrage-poids » du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR).

Conformément à ces recommandations, les situations étudiées sont les suivantes :

- Situation normale d'exploitation ;
- Situation rare de défaillance du drainage ;
- Situation exceptionnelle de crue ;
- Situation rare de crue de chantier ;
- Situation accidentelle sismique ;
- Situation extrême de crue.

Les état-limites étudiés sont les suivants :

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

Pour l'étude de la solution avec réhausse du barrage, une revanche de 0.90 m est conservée entre la crête de l'ouvrage et le niveau des PHE de manière analogue à la revanche actuelle.

3.2. EVACUATION DES CRUES

3.2.1. Evacuateur de crues

3.2.1.1. Evacuateur de crues existant

Initialement l'évacuation des crues se faisait via les 4 seuils frontaux existants non vannés (2 en rive gauche et 2 en rive droite) passant en pertuis sous la crête du barrage, et dont les radiers étaient calés à la cote 940.32 m NGF. En 2002, les pertuis ont été rénovés et modifiés pour une cote radier à 940.00 m NGF. Enfin depuis 2008, l'un des seuils en rive droite a vu son radier modifié à nouveau pour être abaissé jusqu'à la cote 937.00 m NGF.

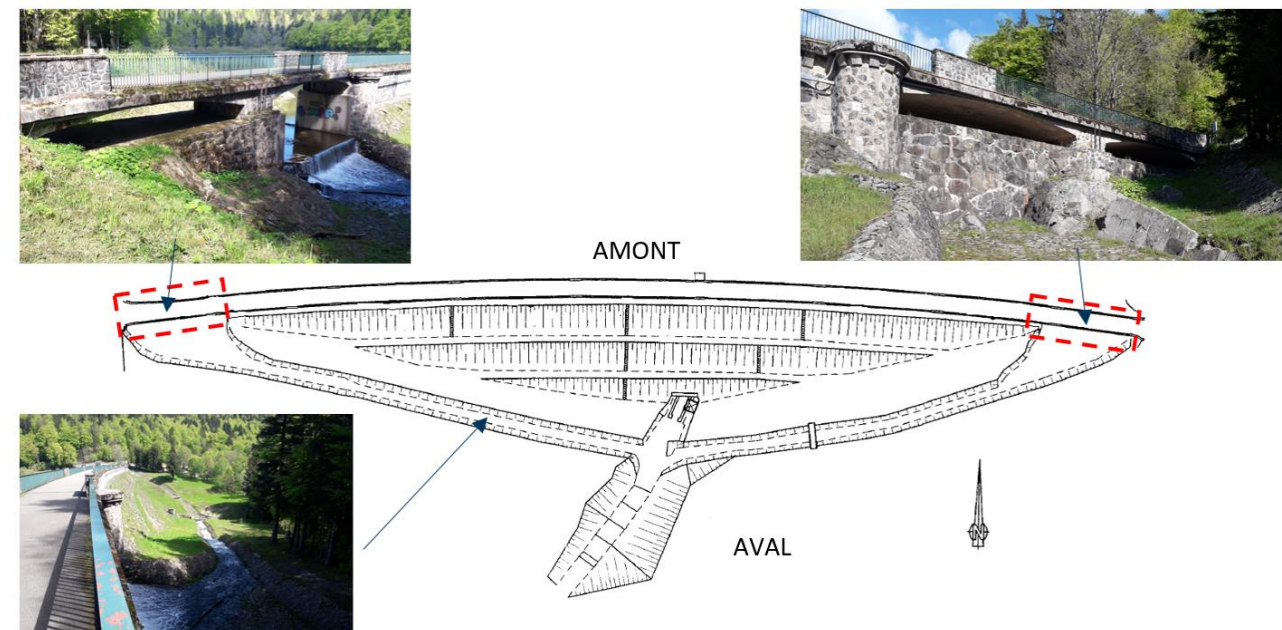


Figure 14 – Illustration des déversoirs de crue existants

L'eau est ensuite évacuée par deux coursiers (l'un en rive gauche et le second en rive droite), convergeant à l'aval de l'ouvrage en un chenal unique qui retrouve le lit de la Lauch.

3.2.1.2. Nouvel évacuateur de crues

La capacité d'évacuation totale des évacuateurs existants était estimée à 54.3 m³/s sous la cote PHE 941.10 m NGF lorsque les seuils étaient en radier à la cote 940.32 m NGF. Depuis 2009, la capacité totale des pertuis dans la configuration provisoire actuelle (avec l'un des quatre radiers de pertuis abaissé à la cote 937.00 m NGF) doit être évidemment supérieure à cette valeur, mais elle reste non estimée à ce jour sans que cette inconnue ne porte préjudice à la sûreté de l'ouvrage. En effet l'arrêté du 6 août 2018 fixant les prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages, en vigueur actuellement, indique que la crue de projet pour un barrage de classe A et un barrage de classe B reconstruit est la crue de période de retour 1000 ans. Le débit de pointe issu de l'étude hydrologique de 2009 pour cette crue millénale est de 48 m³/s, bien inférieur à la capacité d'évacuation estimée du barrage avant sa configuration provisoire depuis 2008 : des travaux sur l'évacuateur de crues ne s'imposeraient donc pas.

La mise en place de la recharge aval en BCR pour le confortement de l'ouvrage nécessite l'obturation d'un ou de plusieurs pertuis existants. Le choix s'est donc porté à la construction d'un nouveau déversoir central à surface libre.

La mise en place du nouvel évacuateur d'une capacité minimum de 80 m³/s souhaité par le Maître d'Ouvrage, permet de clarifier cette situation et offrira une importante marge de sécurité par rapport aux exigences de l'arrêté technique du 6 août 2018.

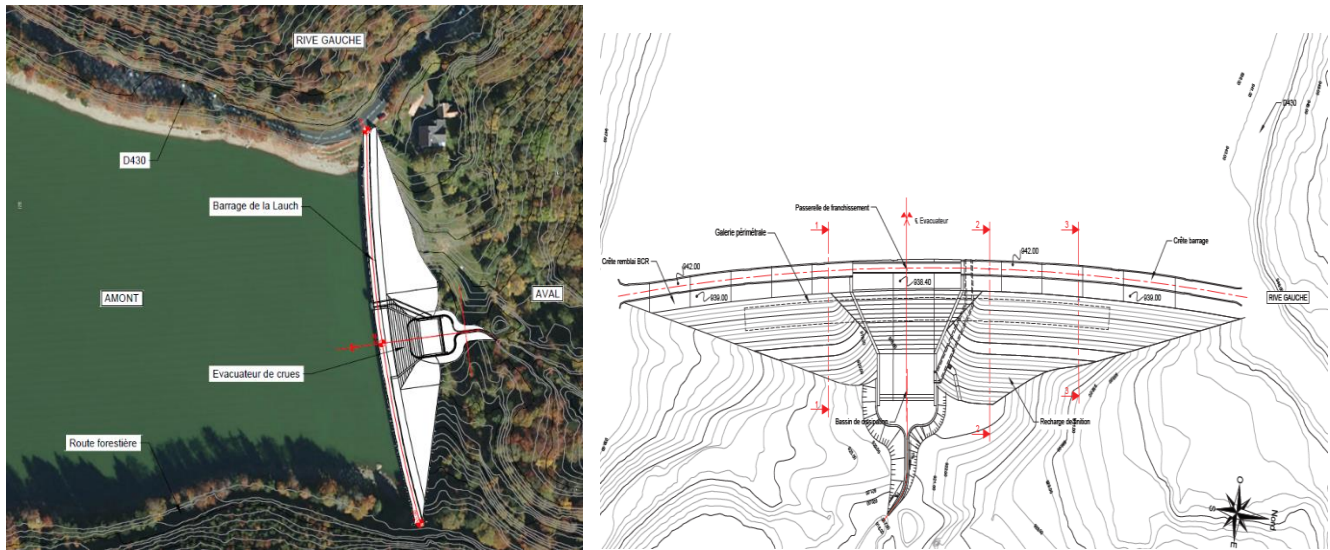


Figure 15 – Implantation du nouvel évacuateur unique de sécurité

3.2.2. Vidange de fond

Dans le cadre des travaux sur l'aménagement, le Maître d'Ouvrage souhaite doter l'ouvrage d'un dispositif adapté aux éventuels besoins de vidange rapide du lac et d'une gestion dynamique des volumes de crues, avec notamment une capacité maximale de vidange supérieure à $15\text{m}^3/\text{s}$ pour permettre la gestion de la crue centennale de référence.

Ainsi, le Maître d'Ouvrage souhaite la construction d'une nouvelle galerie de vidange visitable dotée de nouvelles vannes de largeur suffisante pour augmenter en ce sens la capacité de restitution du barrage.

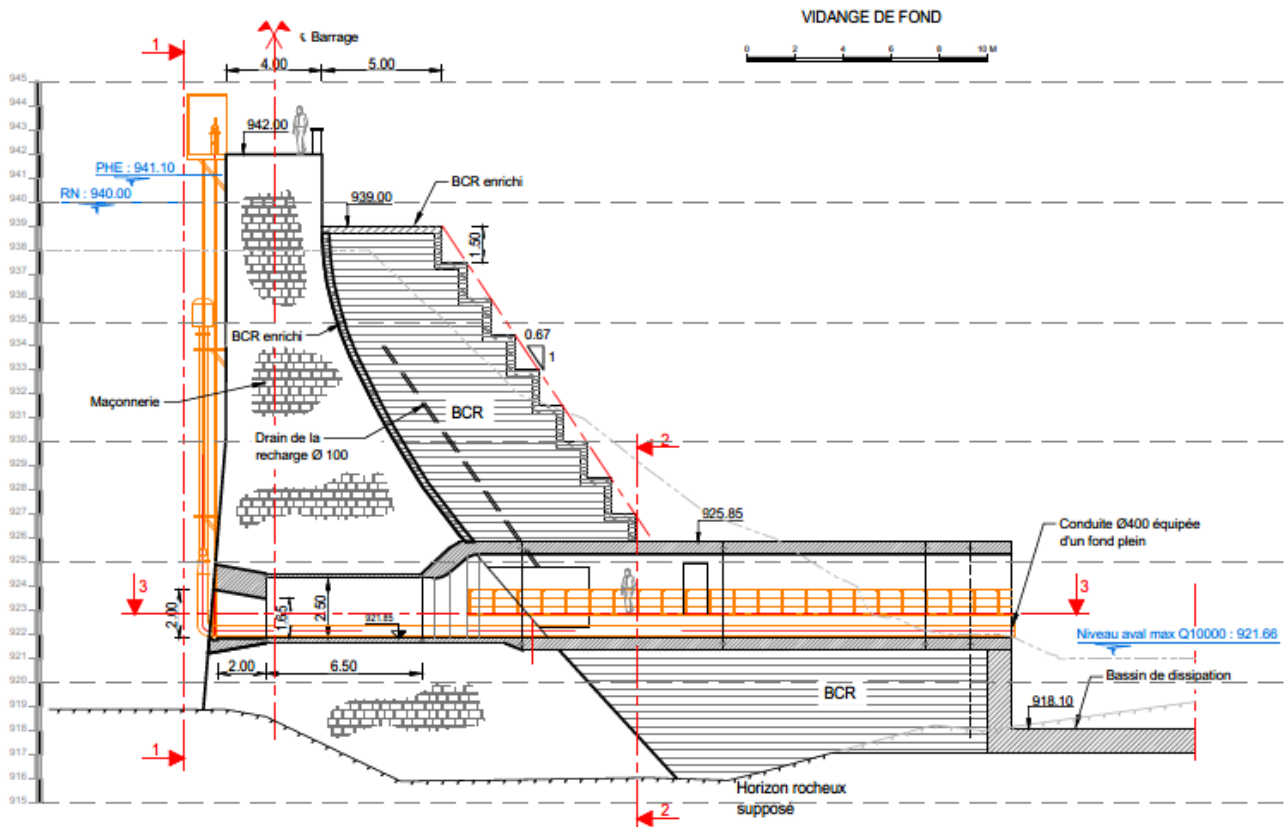


Figure 16 - Principe de la nouvelle galerie de vidange de fond visitable

3.3. AUTRES CRITERES

3.3.1. Galerie de drainage

Conformément au souhait du Maître d’Ouvrage, une galerie de drainage, visitable entre la fondation en pied aval du barrage et la recharge sera construite, afin notamment de :

- Améliorer la stabilité de l’ouvrage ;
- Faciliter la surveillance visuelle et l’intervention sur l’ouvrage, même en cas de pannes du dispositif d’auscultation.

3.3.2. Compatibilité avec un futur projet hydroélectrique

Deux prises d’eau dotées de crépines en inox sont présentes sur la face amont du corps maçonné du barrage. Elles aboutissent après un coude en une seule conduite de DN400 dans la petite galerie de restitution derrière les vannes de fond.

Conformément au souhait du Maître d’Ouvrage, ce dispositif doit être conservé ou remplacé par un dispositif équivalent, complété par un dispositif de raccordement dans la nouvelle galerie de restitution (exemple : pose d’une bride et d’une vanne), en vue d’un éventuel futur projet de conduite forcée à partir des eaux de la retenue.

4. PRINCIPES GENERAUX DU CONFORTEMENT

Deux variantes de confortement sont étudiées au stade AVP :

- Une variante avec une altitude de la crête du barrage conforté qui reste inchangée par rapport à la configuration actuelle. Cette variante est dite « sans réhausse » ;
- Une variante avec une altitude de la crête du barrage conforté qui est rehaussée de 3 m par rapport à la configuration actuelle. Cette variante est surtout envisagée pour un stockage supplémentaire pour les ressources en eau. Les études hydrauliques montrent qu'elle n'améliore qu'à la marge la capacité de la retenue à écrêter la crue de projet.

Les solutions techniques de confortement communes aux deux variantes sont présentées dans ce chapitre. Les dispositions spécifiques relatives à chacune des variantes sont détaillées :

- Au §5 pour la solution sans réhausse ;
- Au §6 pour la solution avec réhausse.

Il est à noter que l'étude de la stabilité du barrage de la Lauch dans sa configuration actuelle (RN 937.00 m NGF) a déjà fait l'objet d'un rapport dédié de l'IRSTEA en 2019. Par conséquent, seule l'étude de la stabilité du barrage suivant les deux variantes de confortement sont présentées ci-après.

4.1. CONSERVATION DU CORPS DU BARRAGE EN MAÇONNERIE

Compte tenu des informations disponibles sur son état actuel, et des études menées sur son aptitude à résister aux sollicitations sismiques réglementaires, en considérant la mise en place d'une nouvelle recharge aval en BCR, et des études menées sur son aptitude à résister aux sollicitations sismiques réglementaires, il est retenu de conserver le corps en maçonnerie existant du barrage.

Les travaux suivants seront par ailleurs prévus à l'occasion de la vidange complète de la retenue au pied amont du barrage et de la démolition de la recharge existante :

- Des travaux de rejointoiements seront prévus au niveau du parement amont, notamment pour les parties immergées et/ou soumises au battillage ;
- Des injections de la maçonnerie pourront être effectuées ponctuellement si cela s'avère nécessaire au regard des observations faites suite à la vidange complète et le démantèlement de la recharge aval existante ;
- Des travaux de finitions sont également prévus au droit de la connexion avec la passerelle de franchissement du nouvel évacuateur de crues ;
- Sur toute l'emprise de la nouvelle recharge, le parement aval de la maçonnerie fera l'objet d'un traitement mécanique (bouchardage ou également hydrodécapage) permettant d'obtenir des aspérités centimétriques. Ces aspérités ont pour vocation d'assurer un meilleur collage et une meilleure résistance au cisaillement au contact entre la maçonnerie et la nouvelle recharge.

4.2. DEMOLITION DE LA RECHARGE AVAL EXISTANTE ET DE LA FOUILLE AVAL

La recharge aval existante est constituée d'un remblai de « cailloux, blocs et sable », selon les reconnaissances géotechniques, d'une granulométrie variant entre 2 cm et 20 cm. Elle est recouverte, sur sa face aval, d'un perré en maçonnerie. Un « matériau drainant », ou matériau de transition, sépare la recharge aval du barrage en maçonnerie.

La recharge existante prend appui, au pied aval du barrage en maçonnerie, sur la « fouille aval », remblaiement de l'excavation ayant permis la construction du barrage. La qualité de ce matériau de fondation de la recharge aval n'est pas satisfaisante.

Le programme de travaux de confortement du barrage de la Lauch, prévoit de retirer :

- La recharge aval existante et son perré ;
- Le matériau de transition ;
- Le matériau de « fouille aval ».

Ces matériaux pourront, selon leur nature et leurs propriétés, être réutilisés pour les mesures compensatoires d'aménagement à l'amont du lac d'espaces de reproduction des batraciens et des populations piscicoles.

4.3. NOUVELLE RECHARGE AVAL EN BETON

Les études antérieures ont conduit à prévoir le confortement du barrage par un remplacement de la recharge aval existante, faite en remblai de terre et de matériaux du site, par une recharge en matériau plus raide et dont les caractéristiques mécaniques sont de type équivalent à un béton compacté au rouleau (BCR).

4.3.1. Caractéristiques

La nouvelle recharge en Béton Compacté au Rouleau (BCR) sera mise en place après démantèlement de la recharge existante et décapage de son assise jusqu'au rocher. Au stade AVP, le critère préliminaire d'arrêt d'excavation du rocher sous la fouille aval est une vitesse des ondes de compression de 2000 m/s. Un traitement local de la fondation peut être réalisée en cas de découverte d'accidents géologiques ne permettant pas, de manière locale, l'atteinte de ce critère sur une profondeur significative.

Un béton de réglage sera mis en œuvre pour permettre une assise du BCR sur une surface plane et de largeur adaptée à sa mise en œuvre. Les dimensions minimales indicatives d'une telle surface plane nécessaire sont de l'ordre de 5x10 m².

La recharge présente une largeur minimum de 5.00 m sauf au droit de la galerie de drainage de la recharge. Il s'agit de la largeur minimale habituellement requise pour le passage du rouleau compacteur sans porter significativement préjudice à la vitesse de construction du BCR. En crête, cela permettra également un accès à l'interface recharge/maçonnerie et facilitera l'auscultation ultérieure de l'ouvrage.

Dans la zone immédiatement à l'aval de la galerie de drainage de la recharge, la planche d'essai du BCR permettra de déterminer :

- Si des rouleaux compacteurs de plus faibles dimensions permettent de mettre en œuvre le BCR ;
- Ou si la mise en œuvre d'un BCR enrichi au coulis puis vibré est plus efficace ;
- Voire si la mise en œuvre locale d'un béton conventionnel vibré est nécessaire.

En partie centrale du barrage, un nouvel évacuateur de crues sera aménagé : le coursier sera délimité par des bajoyers convergents, aboutissant dans un bassin de dissipation. L'eau cheminera, entre les bajoyers, directement sur la face aval de la recharge en BCR.

Afin de permettre le compactage du BCR, les faces amont (contact barrage / recharge) et aval de la recharge seront enrichies d'un coulis de ciment. En outre, ce coulis confèrera une étanchéité, une résistance mécanique et une résistance à l'abrasion proche du béton conventionnel, et du moins suffisante pour assurer la pérennité de l'ouvrage, y compris dans la partie la plus sollicitée que constitue le coursier de l'évacuateur de crue. L'épaisseur préliminaire de la

couche de BCR enrichie au coulis de ciment est de l'ordre de 30 cm, à ajuster en fonction des résultats de la planche d'essai du BCR.

Sur les parements aval et supérieur, cette résistance plus importante est nécessaire pour la résistance au gel/dégel qui est dimensionnante dans la région.

La face aval de la recharge sera coffrée et présentera une géométrie en marches de 1.50 m de hauteur, favorisant notamment la dissipation d'énergie au niveau de l'évacuateur de crues.

La mise en œuvre du BCR est prévue de manière classique pour ce type de matériau. Un bétonnage par couches étalées et compactées à l'avancement avec une épaisseur après compactage de 30 cm. Le béton pourra être acheminé par tapis roulant ou par camion. L'acheminement par camion est généralement retenu par les entreprises en charge des travaux du fait du faible volume à placer et du coût élevé de mobilisation d'un tapis. L'enrichissement de la face aval, contre les coffrages, se fait également à l'avancement, couche après couche.

Compte tenu des contraintes de planning, et sans préjuger de la résistance requise pour le BCR, le choix s'oriente vers à ce stade vers un BCR très ouvrable avec un indice/temps Vebe modifié maximal de 15 s. L'objectif étant de limiter le nombre de passes de compactage à 6 unités (aller/retour) et de ne pas avoir à traiter les joints de reprise horizontale dits « chauds ». **Un BCR de ce type sera obtenu grâce à l'utilisation d'une proportion élevée de farine de roche, de cendres volantes, de laitier de haut fourneau ou de pouzzolane naturel mais également de retardateur de prise.**

Des joints de retrait sont prévus dans la recharge BCR, avec un espacement de 15.00 m dans le sens rive à rive, qui est la valeur usuelle pour ce type d'ouvrage. Ces joints seront réalisés au cours de la construction de la recharge à l'aide d'une lame vibrante recouverte d'une feuille de PEHD insérée dans la couche fraîchement compactée.

Une première pause sera marquée dans la montée du BCR afin de permettre la construction de la galerie de vidange/prise d'eau et de la galerie de drainage, fondée à la côte 922.00 m NGF. Une fois les bétons de la galerie réalisés, la recharge BCR sera poursuivie dans un premier temps de part et d'autre de la galerie puis de manière continue.

Une seconde pause sera réalisée dans la montée du BCR, avant l'arrêt du chantier à l'approche de la période hivernale de la première année de travaux.

Dans l'étude actuelle AVP, une **largeur de recharge minimale de 5 m** a été adoptée pour permettre la mise en œuvre d'une solution de type BCR. Néanmoins, l'inclusion d'une galerie de drainage dans cette recharge de relativement faible épaisseur oblige l'adoption de principes constructifs spécifiques de mise en œuvre du béton dans l'emprise de celle-ci. Cette singularité peut rendre le BCR moins compétitif financièrement et techniquement. **Au stade PRO les largeurs requises et l'intérêt du maintien de la solution BCR seront étudiés et statués.**

4.3.2. Matériaux

4.3.2.1. Corps de la recharge en BCR

Le béton pris en compte au stade des études AVP pour la réalisation de la recharge aval est un BCR. Il est prévu que les granulats utilisés pour la confection de ce béton soient similaires à ceux que l'on retrouve dans un béton conventionnel vibré, avec un diamètre maximum des granulats de 40 mm.

Le type de ciment, la provenance du sable ainsi que les éventuels adjuvants qui seront utilisés pour la confection de la matrice cimentaire, restent encore à définir.

4.3.2.2. BCR enrichi au coulis de ciment sur l'extérieur de la recharge

Afin de permettre le compactage contre les faces verticales et inclinées, ainsi que pour lui conférer des caractéristiques d'étanchéité et une résistance à l'abrasion proches de celles d'un béton conventionnel la risberme supérieure (hors emprise de l'évacuateur de crues) et les faces amont et aval de la recharge en BCR seront enrichies d'un coulis de ciment.

4.3.2.3. Couche supérieure en BCV au droit de l'évacuateur

La risberme supérieure de la recharge aval, d'une largeur de 5.00 m, sera recouverte d'une dalle de réception en béton conventionnel vibré et armé (BCV) au droit de l'évacuateur de crues uniquement si les résultats de la planche d'essai du BCR montrent que le BCR enrichi au coulis de ciment ne permet pas d'atteindre une résistance suffisante. L'étanchéité à l'interface barrage / recharge sera assurée par la mise en place :

- D'un joint hydrogonflant au contact entre la dalle de réception éventuellement en béton armé et la maçonnerie ;
- D'une bande Hypalon à la surface de la dalle de béton, permettant d'apporter une redondance au système d'étanchéité.

4.4. VIDANGE DE FOND

Le système de vidange de fond actuel est constitué d'une vanne plate de 0.90 * 0.40 m² et d'une deuxième vanne plate de 0.90 * 0.40 m² opérationnelle sur une demi-section qui permettent de respecter les règles de dimensionnement des vidanges de fond (diminution de 50% de la poussée sur le barrage en 7 jours et vidange complète en 21 jours).

Au stade AVP, afin de répondre au cahier des charges imposé par le Maître d'Ouvrage, il est considéré :

- une vanne unique de dimension 0.80 * 2.00 m² installée en remplacement du système actuel (voir plus loin dans ce paragraphe pour le dimensionnement) ;
- la commande de cette vanne se fait depuis une chambre des vannes située à la verticale en crête du barrage (couronnement – voir image de droite).

En phase PRO le nombre de vannes et leur position (vanne(s) de fond et vanne(s) de régulation), et le dispositif de manœuvre, seront étudiés de manière plus approfondie.

Le débit évacué calculé ci-après correspond au débit en sortie directe de la vanne de vidange de diamètre 0.80 * 2.00 m². L'écoulement à surface libre qui s'effectue dans la galerie et les pertes de charge linéaires et singulières qui s'y produisent ne sont donc pas considérées.

Le débit est calculé en fonction de plusieurs ouvertures de vanne, par le biais du coefficient α . Une vanne fermée implique $\alpha = 0$; une vanne entièrement ouverte implique $\alpha = 1$.

Le lit de la galerie se situe à une côte de 921.85 m NGF.

L'équation de Bernoulli généralisée donne :

$$z_{\text{réservoir}} = z_{\text{restitution}} + \frac{V^2}{2g} + \Delta H = z_{\text{galerie}} + \alpha + (1 + K) \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Avec :

$z_{\text{réservoir}}$: niveau d'eau dans le réservoir ;

$z_{\text{restitution}}$: côte de restitution = côte du lit de la galerie + demi-ouverture de vanne ;

V : vitesse de l'écoulement ;

ΔH : pertes de charge singulière au niveau de la vanne ;

K : coefficient de perte de charge singulière de la vanne.

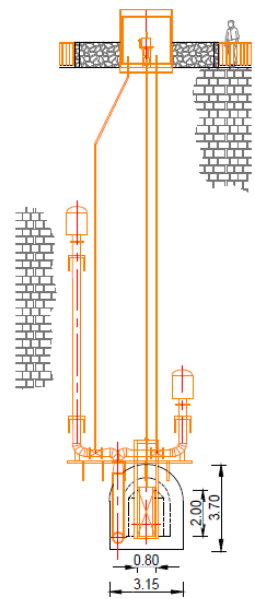


Figure 17 - Principe des vannes de la vidange de fond

Un coefficient de perte de charge K égal à 1 est retenu. Ainsi l'équation devient :

$$z_{\text{réservoir}} = z_{\text{galerie}} + \alpha + 2 \cdot \frac{V^2}{2g} = z_{\text{galerie}} + \alpha + \frac{Q^2}{S^2 g}$$

Avec :

S : la section de sortie du fluide, égale à 1.6α compte tenu des dimensions de la vanne.

On obtient alors :

$$z_{\text{réservoir}} = 0,4 \cdot \frac{Q^2}{\alpha^2 g} + 921,85 + \alpha \rightarrow Q = \sqrt{\frac{(z_{\text{réservoir}} - 921,85 - \alpha)\alpha^2 g}{0,4}}$$

Le graphique ci-dessous illustre la relation « niveau du réservoir – débit évacué » pour différentes ouvertures de la vanne :

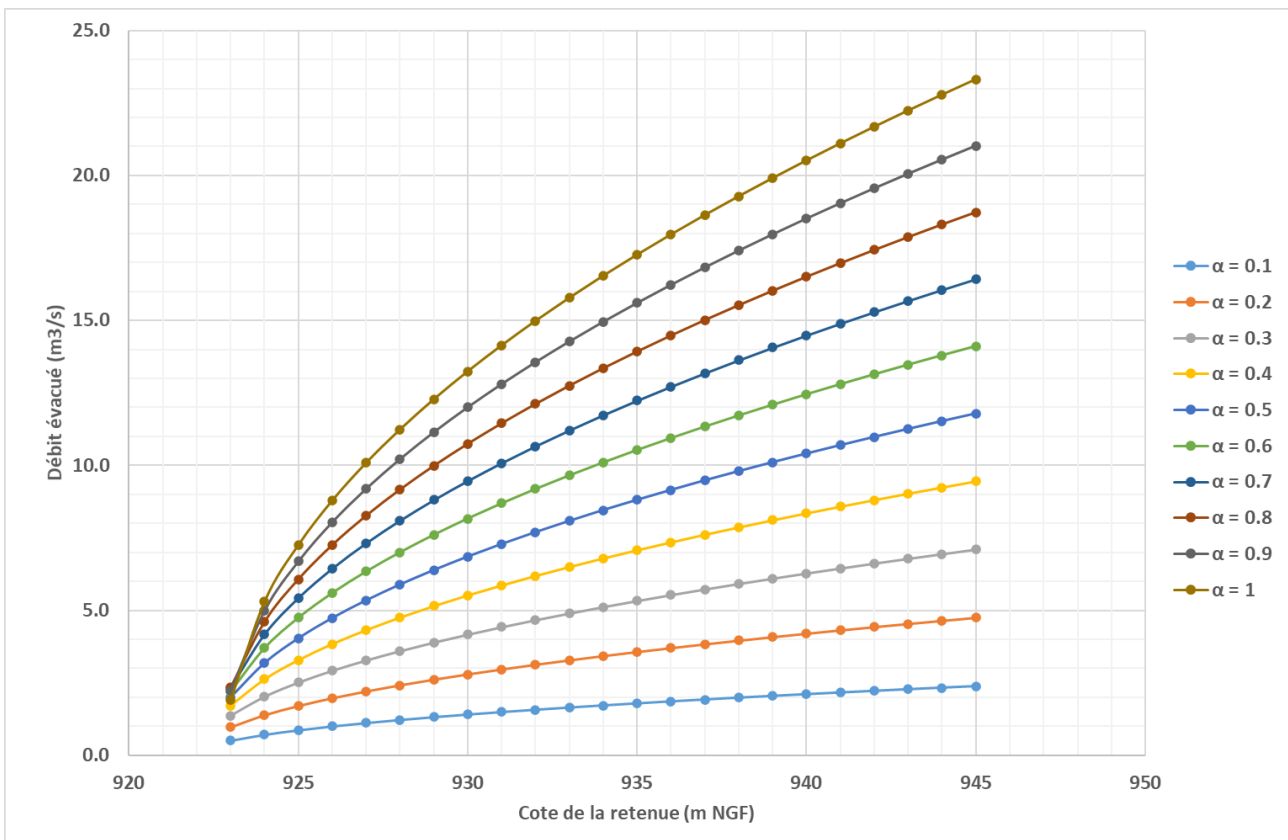


Figure 18 – Relation « charge-débit » de la vanne de fond projetée

Le choix d'une vanne de dimension 0.80 * 2.00 m² permet donc de satisfaire à ce stade AVP le critère de conception souhaité par le Maître d'Ouvrage, à savoir une capacité minimale d'évacuation de 15 m³/s, indépendamment des variantes de réhabilitation du barrage.

Ce choix permet également de respecter largement le dimensionnement usuel des vannes de vidange, à savoir :

- Diminution de moitié de la charge d'eau en moins de 7 jours :

- Soit environ 600 000 m³ à évacuer en l'absence de réhausse (RN = 940 m NGF), ce qui conduit à un débit d'évacuation moyen de 1.00 m³/s sur 7 jours,
 - Soit environ 850 000 m³ à évacuer en cas de réhausse (RN = 943 m NGF), ce qui conduit à un débit d'évacuation moyen de 1.41 m³/s sur 7 jours.
- Vidange totale de la retenue en moins de 21 jours :
 - Soit environ 680 000 m³ à évacuer en l'absence de réhausse (RN = 940 m NGF), ce qui conduit à un débit d'évacuation moyen de 0.38 m³/s sur 21 jours,
 - Soit environ 1 000 000 m³ à évacuer en cas de réhausse (RN = 943 m NGF), ce qui conduit à un débit d'évacuation moyen de 0.55 m³/s sur 21 jours.

4.5. GALERIE DE VIDANGE/PRISE D'EAU

Les fonctions de vidange / restitution, et les prises d'eau pour un éventuel projet hydroélectrique, seront regroupées dans une galerie de dimensions intérieures 2.00 m de largeur et 3.50 m de hauteur, traversant le barrage en maçonnerie ainsi que la recharge en BCR à l'emplacement de l'actuelle galerie.

L'écoulement de l'eau vidangée se fera à surface libre sur le radier de la galerie. Une plateforme située à 1.00 m au-dessus du radier permettra un accès d'exploitation hors eau dans la galerie. Une piste extérieure aménagée permettra d'atteindre l'entrée de la galerie.

La galerie débouchera à l'aval dans le bassin de dissipation en pied aval de l'évacuateur de crues, mutualisant cette partie d'ouvrage dans une optique d'optimisation du projet. Le fonctionnement hydraulique de ce bassin de dissipation fera l'objet d'une analyse approfondie au stade PRO.

De même, une variante avec une conduite forcée pourra également être étudiée au stade PRO pour permettre :

- Un accès aux galeries de manière sécurisée même en phase de vidange ;
- Des conditions de dissipation d'énergie facilitées à l'aval par l'adjonction d'une vanne de type jet-creux par exemple ;
- L'absence d'interaction entre les niveaux des deux galeries (vidange et drainage) à cause du risque d'envolement de la seconde en cas de vidange ;
- Un accès permanent à la conduite de prise d'eau pour l'entretien et la maintenance qui sera alors installée en parallèle de la conduite de vidange.

4.6. GALERIE DE DRAINAGE

Une galerie transversale à la galerie de vidange de fond, fondée à la cote 922.00 m NGF, permettra la collecte des débits issus des drains et les inspections visuelles de l'exploitant. Les parements de la galerie seront constitués côté amont du parement aval du barrage en maçonnerie et côté aval de la recharge en BCR. Les autres éléments de la galerie sont :

- Un radier en béton armé pouvant être préfabriqué ;
- Une dalle de couverture préfabriquée en béton armé appuyée au parement maçonné et reposant directement sur la recharge à l'aval. Le choix de la préfabrication permet de réduire significativement les délais associés à cette étape située sur le chemin critique, afin de reprendre au plus tôt la construction de la recharge en BCR.

Les dimensions intérieures retenues à ce stade AVP sont une hauteur libre de 2.50 m et une largeur de 2.00 m. La galerie pourra ainsi permettre le montage de foreuses pour la réalisation des drains. Une légère pente descendante en direction du centre de l'ouvrage permet l'évacuation des débits vers la galerie de vidange de fond, via des caniveaux en fond de galerie.

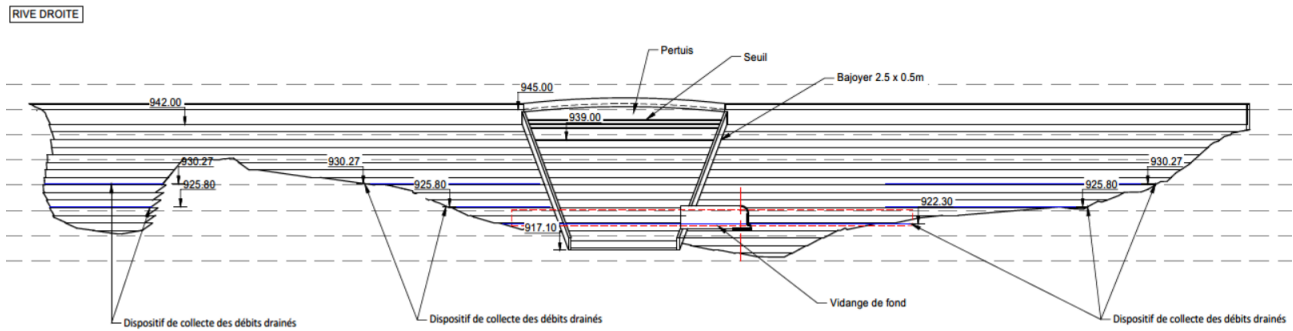


Figure 19 – Position de la galerie de drainage (en pointillés rouge)

Sur la rive droite du barrage, il existe potentiellement une zone de contact BCR/rocher profond délimitée par un éperon rocheux sur sa rive gauche, limitant l'extension de la galerie de drainage. Cette particularité n'est pas prise en compte au stade AVP. Par conséquent, en fonction des résultats des investigations géotechniques complémentaires qui seront réalisées au démarrage de la phase PRO, une galerie disposée dans la direction amont/aval pourra être mise en œuvre dans cette zone pour permettre une inspection visuelle ainsi qu'un drainage adapté.

4.7. DRAINAGE DE LA FONDATION

Il est prévu le drainage de la fondation par la mise en place de drains de fondation, forés dans le barrage en maçonnerie et le rocher de fondation à partir de la face aval du barrage en maçonnerie. Les drains, espacés de 5.00 m, auront une profondeur variable suivant la position d'implantation, avec un minimum de 5.00 m sous le contact barrage / fondation.

Sur la base de notre expérience et suivant la pratique adoptée par la profession, ces drains doivent s'étendre jusqu'à environ $0.50 \times H$, H étant la distance entre la cote de la RN et le niveau le plus bas de contact entre le barrage et la fondation de la section considérée.

Sur la partie centrale, les drains débouchent à une cote proche de 922.00 m NGF dans la galerie de collecte des drains. En dehors de l'emprise de la galerie de drainage, les drains seront réalisés depuis le parement aval et raccordé à un système de collecte.

L'angle des drains sera ajusté pour que le fond du drain se situe à environ mi-distance entre le pied amont et le pied aval du barrage en maçonnerie.

Le diamètre minimum des drains est de 100 mm.

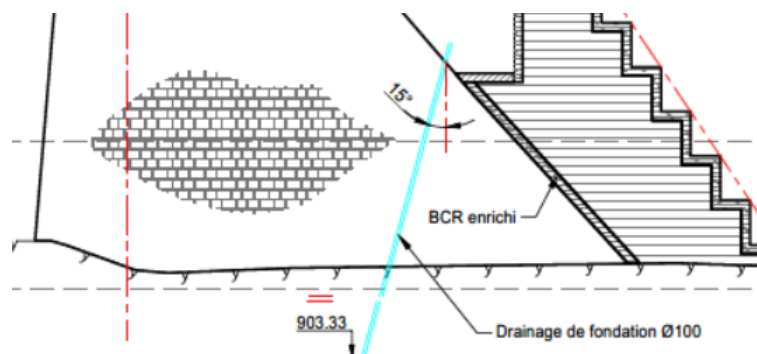


Figure 20 - Exemple du principe de drainage depuis la galerie de collecte des drains

4.8. DRAINAGE DE LA RECHARGE

Il est prévu le drainage de la recharge en BCR afin d'améliorer la stabilité de l'ouvrage et d'éviter que la recharge constitue un écran étanche mis en pression par les éventuelles percolations résiduelles à travers la maçonnerie. Les drains sont espacés de 5.00 m.

Dans l'emprise de la galerie de drainage, ces drains seront forés depuis la partie supérieure de la galerie jusqu'à une cote d'environ 2.00 m sous le niveau d'arase de la recharge.

En outre, des auréoles de drainage seront forées depuis les extrémités de la galerie de drainage, en direction des rives de manière à assurer un drainage efficace en dehors de l'emprise de la galerie. Ce dispositif sera complété en dehors de la zone d'emprise de la galerie de drainage par des drains forés depuis le parement aval de la recharge dont l'implantation est alternée entre 2 drains successifs.

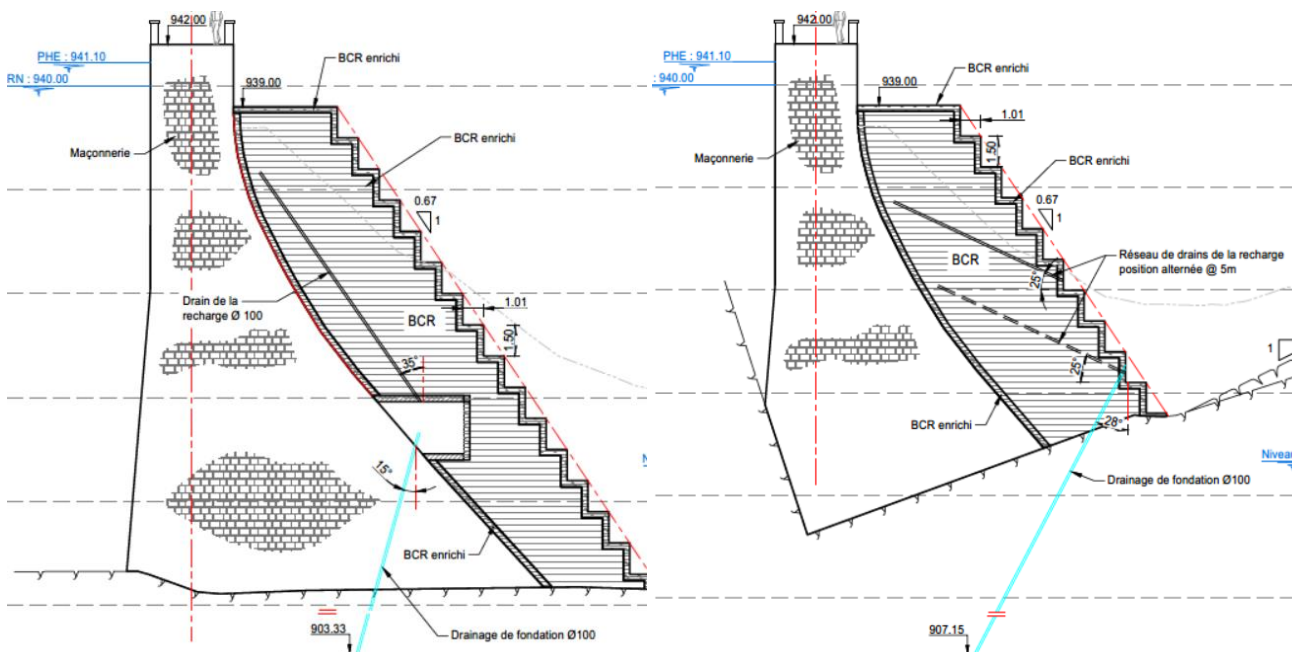


Figure 21 - Exemple du principe de drainage depuis la galerie de drainage (à g.) et depuis la face aval de la recharge (à dr.)

4.9. MODIFICATION DES OUVRAGES D'EVACUATION DES CRUES

Suite aux résultats des études hydrologiques, la capacité du dispositif actuel d'évacuation des crues du barrage de la Lauch est inadaptée au débit de pointe à prendre en compte de 80 m³/s. De plus les pertuis existants et/ou leurs coursiers d'évacuation sont situés dans l'emprise de la future recharge de confortement.

Le nouvel évacuateur de crues est un unique seuil frontal aménagé au sommet et au centre du barrage. Le coursier de l'évacuateur sera aménagé sur le parement aval de la recharge de confortement.

Un bassin de dissipation en béton armé sera réalisé en pied de recharge aval dans le but de limiter les risques d'érosion du lit de la Lauch en aval immédiat des ouvrages.

Les pertuis des seuils frontaux rive droite et rive gauche seront obturés. Néanmoins, afin de préserver la sûreté de l'ouvrage durant les travaux, les pertuis seront conservés jusqu'à la mise en service du nouvel évacuateur. Au cours des travaux, l'évacuation d'une crue par les pertuis sera réalisée par surverse sur la maçonnerie, le BCR, les galeries, et le fond de fouille bétonné afin d'éviter l'affouillement du pied aval du barrage.

4.9.1. Seuil déversant

Le dimensionnement du nouveau seuil déversant du barrage de la Lauch doit permettre le franchissement d'un débit de 80 m³/s. Le niveau d'eau devra alors respecter la cote des plus hautes eaux fixée à 1.10 m au-dessus de la cote de RN, quelle que soit la variante étudiée.

La longueur du seuil est déterminée à l'aide de la formule de débitance sur seuil libre :

$$Q = \mu L \sqrt{2gH^3}$$
$$\text{Soit } L = \frac{Q}{\mu \sqrt{2gH^3}}$$

Avec :

Q : débit de dimensionnement, ici égal à 80 m³/s ;

μ : coefficient adimensionnel de débit du seuil, pris ici égal à 0.4. Cette valeur est conservative compte tenu de la configuration du seuil : seuil profilé, alimentation frontale, absence de pile intermédiaire ;

L : longueur déversante ;

g : accélération de la pesanteur, égale à 9.81 m/s² ;

H : charge hydraulique sur le seuil, compté comme la différence entre les plus hautes eaux et la crête soit 1.1 m.

Il résulte de cette équation une longueur déversante L égale à 40 m.

4.9.2. Coursier

Compte tenu de la faible emprise disponible au pied de l'ouvrage, le choix s'est porté sur un coursier convergent. La largeur en crête de 40 m, au droit du seuil déversant, diminuera à 20 m en pied du barrage à l'entrée du bassin de dissipation.

Cette disposition pouvant conduire à des phénomènes d'ondes de choc du fait de la forte convergence de l'écoulement, les murs bajoyers du coursier sont élevés à une hauteur de 2.50 m au lieu des 0.80 m requis si aucune onde de choc n'était à craindre. Afin d'éviter tout risque de débordement pouvant être causé par ce phénomène, une mesure de sécurité supplémentaire est envisagée, consistant en la réalisation de retours horizontaux, ou « casquettes » d'une longueur de 0.30 m en tête de bajoyer.

4.9.3. Chenal de restitution

Un chenal de restitution excavé au rocher est envisagé dans le but de relier les débits évacués par le barrage à la Lauch. Doté d'une pente longitudinale de 1% permettant l'écoulement des eaux et l'évacuation des débits, il présentera une largeur au plafond de 3.00 m ainsi que des pentes de talus de 1H/5V.

4.10. PASSERELLE DE FRANCHISSEMENT DU SEUIL

A ce stade AVP, afin de supprimer tout risque d'obstruction par des embâcles de la section hydraulique de l'évacuateur de crues, aucune pile intermédiaire n'est envisagée sur toute la longueur du seuil déversant. Le franchissement de seuil en crête sera assuré par une passerelle de 40 m de portée en appui sur la crête du barrage en maçonnerie de part et d'autre du seuil.

Par ailleurs, la revanche existante entre la côte des PHE et la crête du barrage, d'environ 0.90 m, est limitée. Ces contraintes conduisent à la mise en place d'une passerelle de franchissement constituée d'un seul tenant, et arquée afin de gagner en tirant d'air au-dessus de la lame déversante.

Réservée à un usage piétonnier, elle présentera une largeur de passage limitée à 2.40 m. L'intervention d'engins de travaux et de maintenance se ferait sans franchissement du seuil de part et d'autre :

- Depuis la rive gauche, par accès depuis la route RD430 et la crête du barrage ;
- Depuis la rive droite, par la route RD430 puis la piste forestière longeant la retenue jusqu'au barrage en fin de piste.

4.11. DISPOSITIF D'AUSCULTATION

Afin de renforcer le dispositif d'auscultation actuel (voir §1.2), il est prévu d'équiper trois profils du barrage avec les instruments suivants sur chacun d'eux :

Tableau 4 – Dispositif d'auscultation complémentaire

Équipement installé	Emplacement
Trois cellules de mesure de pression interstitielle	<ul style="list-style-type: none"> • Dans le corps en maçonnerie, sur l'axe du barrage, à mi-hauteur • En fondation, sur l'axe du barrage • En fondation, en aval du rideau de drainage
Un puits de décharge	Au pied aval de la recharge aval
Une cellule de pression totale	Au contact maçonnerie/BCR, à mi-hauteur de la recharge
Deux repères de nivellement	<ul style="list-style-type: none"> • Sur la crête du barrage en maçonnerie ou de sa réhausse • Sur la crête de la recharge BCR

Dans la continuité des fréquences actuelles de relevés, cette instrumentation fera l'objet d'un relevé de mesures :

- Hebdomadaire pour le niveau d'eau, la piézométrie, les débits de fuite et les pressions totales ;
- Bi-annuel pour la topographie.

4.12. ETUDE DU REEMPLOI ET DE LA VALORISATION DES MATERIAUX D'EXCAVATION ET DE DEMOLITION

A ce stade AVP, la nature exacte et les quantités de matériaux issus de la recharge existante et du décapage de la fouille aval sont incertains.

En effet, les investigations réalisées lors des campagnes de reconnaissances (1986, 1995, 1996 et 2003) décrivent :

- Pour la recharge aval, la présence de cailloux, blocs, galets ($\varnothing 20$ à $\varnothing 150$ mm) et sable argileux ou argile brun/beige. La fouille à la pelle réalisée en 1995 précise également la présence de blocs noirs ($\varnothing 150$ mm) décrits tels que synthétiques ou goudron ou résidus d'injection à proximité du contact avec le barrage ;
- Pour la fouille aval, la présence de vides ou zones de décompression, des débris de bois ainsi que des argiles limono-graveleuses et des galets ($\varnothing 20$ à $\varnothing 50$ mm) ;
- Des niveaux de délimitation variables entre la recharge existante et la fouille aval suivant les profils étudiés, ainsi qu'une géométrie variable de la fouille aval.

Le Maître d’Ouvrage considère ainsi les matériaux qui seront issus de l’excavation et de la démolition de la recharge aval et de sa fouille, comme inappropriés à la confection des bétons du futur projet de confortement. Les entreprises seront responsables du choix de la qualité des matériaux qu’ils devront mettre en œuvre. En outre, les filières de réemploi évoquées ci-avant semblent suffisantes pour valoriser l’ensemble des matériaux d’excavation et de démolition.

En outre, les voies de réemploi privilégiées à ce stade par le Maître d’Ouvrage sont les suivantes :

- **Réemploi des matériaux de la recharge** aval et des excavations du terrain naturel, à l’amont de la retenue **dans le cadre de l’aménagement de zones de mesures compensatoires** en tant qu’aire de frayères pour les poissons et les batraciens. Les volumes de matériaux nécessaires ne sont pas établis à ce stade ;
- Réemploi pour le reprofilage de pistes (forestières notamment) ;
- Réutilisation des enrochements du perré maçonné dans un autre projet du Maître d’Ouvrage ;
- Mise en décharge adaptée des matériaux impropres au réemploi (goudron, enrobé, matériaux pollués, etc.).

Compte tenu des incertitudes tant sur la nature des matériaux disponibles que sur leurs volumes, des investigations complémentaires sont préconisées au **§Erreur ! Source du renvoi introuvable.** afin de préciser les possibilités de valorisation au stade PRO.

5. SOLUTION TECHNIQUE SANS REHAUSSE

L'Annexe D présente les plans de cette solution technique.

5.1. SPECIFICITES TECHNIQUES DE LA SOLUTION

5.1.1. Recharge en BCR

La recharge présentera une pente moyenne de 0.67H/1V. Il en résulte un volume d'environ 17 918 m³ de BCR à mettre en œuvre.

5.1.2. Seuil de l'évacuateur de crues

Le seuil sera monté au niveau de retenue normale du barrage soit 940 m NGF. Cette disposition implique la démolition partielle de la crête en maçonnerie (à la cote 942 m NGF) au droit du seuil sur 2.00 m de hauteur. Afin d'éviter l'endommagement de la structure, qui sera conservée pour l'ouvrage définitif, la découpe sera réalisée par sciage au câble diamanté.

5.1.3. Comblement des pertuis

Compte tenu de la topographie du site, la mise en œuvre de la recharge nécessite l'obturation complète des pertuis en rive gauche. Les pertuis de rive droite seront obturés partiellement avec la mise en place côté amont d'un béton de masse toute hauteur et toute longueur. A des fins de stabilité, la largeur des plots de béton sera d'environ 0.5 fois leur hauteur.

5.1.4. Dimensionnement du bassin de dissipation

Le dimensionnement du bassin de dissipation est réalisé d'après la méthode de Boes & Minor. Pour le calcul, seule l'énergie résiduelle laissée après la dissipation d'énergie sur les marches aval de la recharge en BCR est considérée. Ainsi, sur les 22 m de dénivelé entre la crête du seuil au niveau 940.00 m NGF et le fond du bassin situé à la cote 918.10 m NGF, les calculs fournissent les résultats suivants :

- Largeur du bassin : 20 m ;
- Energie dissipée : 13.66 m ;
- Energie résiduelle : 8.40 m ;
- Niveau aval : 921.66 m NGF ;
- Fond du bassin de dissipation : < 918.13 m NGF ;
- Hauteur de l'écoulement à l'entrée du bassin : $h_1 = 0.30$ m ;
- Vitesse de l'écoulement à l'entrée du bassin : $V_1 = 13.29$ m/s ;
- Hauteur conjuguée aval : $h_2 = 3.15$ m ;
- Vitesse de l'écoulement après ressaut : $V_2 = 1.27$ m/s ;
- Longueur du bassin : $4.h_2 = 12.6$ m ;

La dalle du bassin de dissipation, d'une épaisseur de 1 m, peut en théorie supporter l'écoulement sans autre disposition supplémentaire. Néanmoins, compte tenu de l'aspect dynamique et turbulent de l'écoulement, et afin d'éviter tout phénomène de vibration, la dalle est prévue ancrée dans la fondation par l'intermédiaire de clous d'ancrage d'une longueur de 2.00 m disposés à raison d'un clou tous les 3.00 x 3.00 m².

5.1.5. Etude de stabilité

La justification de la stabilité du barrage a été réalisée pour deux plots de plus grande hauteur, déversant et non-déversant, et pour plusieurs cas de charges :

- Situation normale N1 ;
- Situation rare de défaillance du drainage R1 ;
- Situation exceptionnelle de crue R2 ;
- Situation rare de crue de chantier R3 ;
- Situation accidentelle sismique E1 ;
- Situation extrême de crue E2.

Le détail de la justification est fourni en Annexe E. Seuls sont rappelés ci-après les principaux résultats vis-à-vis des critères des recommandations du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) pour la justification de la stabilité des barrages-poids.

Le confortement prévu permet de satisfaire l'ensemble des critères de stabilité rappelés ci-après.

Tableau 5 – Vérification des critères de stabilité – Barrage sans réhausse – Profil non-déversant

Situation de projet	Etat-limite d'extension des fissures		Etat-limite de résistance à l'effort tranchant		Etat-limite de flottaison	
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère
N1	0%	0%	1,45	>1	334%	>15%
R1	0%	<25%	1,60	>1	213%	>5%
R2	0%	<25%	1,55	>1	286%	>5%
R3	0%	<25%	1,08	>1	166%	>5%
E1	0%	<100%	1,22	>1	317%	>0%
E2	0%	<100%	1,73	>1	164%	>0%

Tableau 6 – Vérification des critères de stabilité – Barrage sans réhausse – Profil déversant

Situation de projet	Etat-limite d'extension des fissures		Etat-limite de résistance à l'effort tranchant		Etat-limite de flottaison	
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère
N1	0%	0%	1,37	>1	317%	>15%
R1	0%	<25%	1,51	>1	200%	>5%
R2	0%	<25%	1,47	>1	176%	>5%
R3	0%	<25%	1,01	>1	155%	>5%
E1	0%	<100%	1,16	>1	299%	>0%
E2	0%	<100%	1,62	>1	166%	>0%

5.2. PHASAGE DE CONSTRUCTION

5.2.1. Principe du phasage : priorité à la ressource en eau

Durant la vidange du lac de la Lauch, le soutien des étiages de la rivière Lauch sera assuré uniquement à partir des eaux du lac du Ballon. Le Maître d'Ouvrage impose de pouvoir rétablir dès que possible un soutien du débit de la rivière à partir des eaux du lac de la Lauch, y compris pendant la phase de travaux.

Ainsi il est proposé de **regrouper sur la première année toutes les étapes nécessitant la vidange complète** de la retenue. Cette période appelée « phase critique » devra être la plus courte possible.

Principe général de remise en eau partielle du barrage dès que possible durant les travaux : À la fin de cette « phase critique », au terme des travaux d'aménagement de la galerie de vidange et la construction partielle de la recharge en BCR, un second pertuis en rive gauche en crête sera ouvert à la cote 937.00 m NGF, similaire à celui existant en rive droite. Cette option permet, après l'ouverture de ce second pertuis, de remplir partiellement la retenue jusqu'à la cote 937.00 m NGF, cote à confirmer en phase PRO suivant l'analyse de la mobilisation mécanique de la recharge partiellement érigée, et d'ainsi assurer le soutien des étiages de la rivière (et indirectement l'alimentation en eau potable de la vallée de Guebwiller) sans impacter le niveau de sûreté de l'ouvrage vis-à-vis des crues.

5.2.2. Phase 0 : vidange, installation de chantier et gestion des eaux

La **vidange s'effectuera entre début février et fin mars de la première année de travaux** et sera très progressive afin de limiter les impacts sur l'environnement et la diffusion à l'aval dans le cours d'eau de sédiments. Des dispositifs anti-sédiments seront par ailleurs mis en place dans le cours d'eau à l'aval du barrage et une pêche de sauvegarde sera organisée et les poissons pêchés seront remis dans la partie amont du lac, maintenue en eau par la digue batardeau.

Un batardeau amont de protection du chantier sera réalisé, si possible en partie à l'avancée dans l'eau en fin de vidange dès que le plan d'eau sera à un niveau suffisant et inférieur à 927 m NGF sur l'ancienne digue pré-existante, réhaussée de quelques mètres de hauteur. Cela permettra éventuellement de gagner une à deux semaines sur la durée de la « phase critique ».

Le remblai sera constitué de matériaux du lac et éventuellement de matériaux d'un autre site. Il sera renforcé en surface et doté d'organes hydrauliques minimalistes type vanne(s) et buses pour assurer une régulation minimale, et un déversoir de crue en enrochements secs (crue de référence de chantier à déterminer en phase PRO).

Début avril, la vidange complète de la retenue sera réalisée (mise à sec du pied amont de l'ouvrage). Un volume d'eau sera maintenu à l'amont du batardeau de chantier pour préserver la faune aquatique.

A ce stade AVP, la maîtrise des eaux et le dimensionnement des conduites d'évacuation sont laissés à l'initiative de l'Entreprise qui sera chargée des travaux pendant le chantier (notamment pour la dérivation des eaux lors de la démolition de la galerie de vidange et de la construction de la nouvelle galerie de restitution). Il a toutefois été vérifié que deux conduites provisoires de diamètre Ø500, mises en place depuis le pied aval du batardeau jusqu'à l'aval du barrage, permettent le transit d'environ 0.5 m³/s chacune à travers le pertuis de vidange de fond entièrement dégagé et sous des charges hydrostatiques compatibles avec la réalisation d'un batardeau en terre.

5.2.3. Phase 1 : démolition et vidange de fond

Les travaux à réaliser en phase 1 suite à la vidange de la retenue sont les suivants, classés dans l'ordre d'exécution :

1. Réalisation en parallèle de la phase 0 des installations de chantier. A des fins de respect du planning général, les installations débutent à l'issue du 2^{ème} mois des études d'exécution. Cette hypothèse est cohérente avec la possibilité pour l'Entreprise de prioriser les études relatives aux installations de chantier pour leur validation à l'issue du 2^e mois. L'Entreprise pourra ensuite continuer parallèlement aux installations de chantier la réalisation des études relatives à l'exécution du reste des travaux ;
2. Réalisation en parallèle :
 - Du démantèlement de la recharge existante (en concomitance avec la construction du batardeau / phase 0) et démolition de la galerie de vidange existante depuis l'aval du barrage ;
 - Du démantèlement des vannes de prise d'eau et de vidange existantes et de la tuyauterie afférente depuis l'amont, puis du réalésage de la galerie de vidange depuis l'accès amont ainsi créé ;
 - De l'inspection de la maçonnerie, de son rejointoiement, et de la réalisation éventuelle d'injection depuis la crête ou les parements.
3. Réalisation en parallèle :
 - De la mise en œuvre de la recharge BCR jusqu'à la cote 922.00 m NGF, puis du forage des drains en fondation de la galerie de vidange ;
 - Du bétonnage de la galerie de vidange de fond. Cette étape s'effectue d'abord en galerie au sein du barrage en maçonnerie, puis au droit de la recharge en BCR une fois celle-ci réalisée.

Ainsi, la conduite de prise d'eau existante et les vannes seront démantelées au début du chantier afin de laisser l'intégralité de la section du pertuis disponible pour l'écoulement d'eau. La capacité de ce pertuis sans mise en charge (cote de 922.50 m NGF) est de l'ordre de 0.22 m³/s, alors que le module interannuel du cours d'eau est de 0.08 m³/s. Ce pertuis pourra accueillir les débits courants à surface libre, ou les débits des conduites d'évacuation en charge suivant les phases de chantier.

Pour des débits supérieurs, pendant la phase 1, les dispositions suivantes sont envisagées :

- Avec une élévation du plan d'eau à la cote 937.00 m NGF, le pertuis de vidange existant permet l'évacuation de 8.4 m³/s ;
- Avec une élévation du plan d'eau supérieure à la cote 937.00 m NGF, l'eau sera évacuée en partie par le pertuis de vidange, et en partie par le pertuis d'évacuation des crues existant en rive droite, dont le seuil est à 937.00 m NGF. La capacité d'évacuation de ces deux ouvertures est de 27 m³/s sous la cote 938.40 m NGF, correspondant au débit de pointe de la crue centennale. La stabilité du barrage en maçonnerie sans recharge est justifiée pour cette cote (voir Annexe E).

Avec l'évacuation de la recharge existante, les coursiers existants n'assureront plus leur fonction. L'eau déversera donc en cas de crue, depuis le pertuis, sur la maçonnerie et le fond de fouille mis à nu par l'excavation. Aussi, après l'excavation et sur avis d'un géologue, le fond de fouille sera bétonné afin d'éviter l'affouillement en pied aval du barrage en cas de crue.

5.2.4. Phase 2 : galerie de drainage et érection de la recharge BCR

Les travaux à réaliser en phase 2 sont les suivants, classés dans l'ordre d'exécution :

1. Bétonnage sur place du radier la galerie de vidange. Il est prévu pour cette étape sur le chemin critique, la réalisation du radier par 2 ateliers en parallèle, par plots alternés : par exemple bétonnage des plots du radier n°1 et n°3, puis des plots n°2 et n°4, etc. Le bétonnage du radier se finira par les plots à la connexion avec la vidange de fond, de manière à continuer le bétonnage de la vidange de fond (phase 1) en parallèle.
2. Mise en œuvre de la recharge BCR jusqu'à la cote 924.50 m NGF ;
3. Mise en place des dalles préfabriquées constituant le toit de la galerie de drainage ;
4. Réalisation en parallèle :
 - De la mise en œuvre de la recharge BCR jusqu'à la cote 930.00 m NGF ;
 - De l'ouverture d'un puits en rive gauche à la cote 937.00 m NGF, puis de l'obturation amont du puits de vidange de fond avec mise en place des vannes.

Cette seconde phase se termine par l'ouverture d'un puits en rive gauche, calé à la cote 937.00 m NGF, sur le modèle de celui existant en rive droite, puis l'obturation du puits de vidange la mise en service des vannes. Le remplissage partiel de la retenue peut être envisagé jusqu'à la cote 937.00 m NGF, cote à confirmer en phase PRO suivant l'analyse de la mobilisation mécanique de la recharge. Le protocole de remplissage sera également à établir au stade PRO.

À l'issue de cette phase 2, en cas de crue, les débits sont évacués par les deux puits de crête calés à la cote 937.00 m NGF. L'eau déverse depuis les puits, sur la maçonnerie et le fond de fouille bétonné afin d'éviter l'affouillement en pied aval du barrage. La capacité d'évacuation de ces deux puits de crête est de 36 m³/s sous la cote 938.40 m NGF, supérieure donc au débit de pointe de la crue centennale.

Il est prévu que la phase 2 se termine au plus tard en novembre 2024. Si l'hiver est rude (températures inférieures à 5°C et/ou pluie), le montage du BCR n'est pas possible. Une interruption de chantier est donc possible et a été planifiée entre les phases 2 et 3.

5.2.5. Phase 3 : nouvel évacuateur de crues et fin de la recharge BCR

Les travaux à réaliser en phase 3 sont les suivants, classés dans l'ordre d'exécution :

1. Réalisation en parallèle :
 - Du sciage de la partie supérieure du barrage pour la création du futur évacuateur ;
 - De la mise en œuvre de la recharge BCR.
2. Réalisation en parallèle :
 - Du bétonnage du seuil et des bajoyers de l'évacuateur de crues ;
 - De la finalisation de la mise en œuvre de la recharge BCR jusqu'à la cote 939.00 m NGF puis de la réalisation des drains et de l'installation du dispositif d'auscultation

Cette étape se conclut avec la mise en service du nouvel évacuateur de crues.

3. Réalisation en parallèle :
 - De l'obturation des puits existants ;
 - De l'installation de la passerelle au-dessus de l'évacuateur de crues.
4. Remise en état du site et démobilisation.

Il est à noter que certains éléments du dispositif d'auscultation pourront être réalisés au cours de la phase 2 avant de suivre le remplissage partiel de la retenue en fin d'année 1.

Au cours de la phase 3, en cas de crue, les débits sont évacués par les deux pertuis de crête calés à la cote 937.00 m NGF. L'eau déverse depuis les pertuis, sur la maçonnerie, sur la recharge en BCR et le fond de fouille bétonné afin d'éviter l'affouillement en pied aval du barrage. La capacité d'évacuation de ces deux pertuis de crête est de 36 m³/s sous la cote 938.40 m NGF, supérieure donc au débit de pointe de la crue centennale.

À l'issue de cette phase 3, en cas de crue, les débits sont évacués par le nouvel évacuateur de crues en service, calé à la cote 940.00 m NGF. L'eau déverse depuis le seuil sur le coursier et le bassin de dissipation. La capacité d'évacuation du nouvel évacuateur est de 80 m³/s sous la cote 941.10 m NGF, correspondant donc à la capacité d'évacuation finale du barrage conforté.

5.2.6. Synthèse

Le tableau ci-dessous précise les travaux réalisés et les modalités d'évacuation des crues sur l'ouvrage au cours de chacune des phases :

Tableau 7 – Synthèse du phasage de construction – solution technique sans réhausse

Phase	Travaux principaux	Cote de retenue (hors crue)	Modalité d'évacuation des crues
0 – Etat actuel / Vidange et dérivation provisoire	<ul style="list-style-type: none"> Vidange Création du batardeau Dérivation provisoire 	≤ 937.00 m NGF	<ul style="list-style-type: none"> 1 pertuis rive droite à la cote 937.00 m NGF 3 pertuis à la cote 940.00 m NGF
1 – Démolition et vidange de fond	<ul style="list-style-type: none"> Décapage de la recharge existante Réalisation de la recharge en BCR jusqu'à la cote 922.00 m NGF Travaux de génie civil relatifs à la galerie de vidange 	Retenue à sec, évacuation du débit courant par le pertuis de vidange	<ul style="list-style-type: none"> Pertuis de vidange 1 pertuis rive droite à la cote 937.00 m NGF Surverse sur maçonnerie et fond de fouille bétonné pour éviter l'affouillement Débit évacuable 27 m³/s = Q100 à la cote 938.40 m NGF
2 – Galerie de drainage et recharge BCR	<ul style="list-style-type: none"> Galerie de drainage Réalisation de la recharge en BCR jusqu'à la cote 930.00 m NGF Bassin de dissipation Travaux relatifs aux éléments hydromécaniques de la galerie de vidange Ouverture d'un pertuis en RG 	Retenue à sec, évacuation du débit courant par le pertuis de vidange	<ul style="list-style-type: none"> Pertuis de vidange 1 pertuis rive droite à la cote 937.00 m NGF Surverse sur maçonnerie et fond de fouille bétonné pour éviter l'affouillement Débit évacuable 27 m³/s = Q100 à la cote 938.40 m NGF
3 – Evacuateurs de crues et finalisation de la recharge BCR	<ul style="list-style-type: none"> Seuil et bajoyers de l'évacuateur de crues Réalisation de la recharge en BCR jusqu'à la cote 939.00 m NGF Obturation des pertuis 	≤ 937.00 m NGF	<ul style="list-style-type: none"> 1 pertuis rive droite et 1 pertuis rive gauche à la cote 937.00 m NGF Surverse sur maçonnerie et fond de fouille bétonné pour éviter l'affouillement Débit évacuable 36 m³/s > Q100 à la cote 938.40 m NGF

5.3. PLANNING PREVISIONNEL DE CONSTRUCTION

Le planning prévisionnel de construction est détaillé ci-après.

6. SOLUTION TECHNIQUE AVEC REHAUSSE

L'Annexe D présente les plans de cette solution technique.

6.1. SPECIFICITES TECHNIQUES DE LA SOLUTION

6.1.1. Recharge en BCR

La recharge présentera une pente moyenne de 0.6H/1V (contre 0,67 H/1V dans la variante sans réhausse). Il en résulte un volume d'environ 27 340 m³ de BCR à mettre en œuvre (contre 17 918 m³ pour la solution sans réhausse). Outre la plus grande hauteur de BCR à mettre en œuvre, ce volume s'explique également par la nécessité de mettre en œuvre la recharge au droit des pertuis d'évacuation.

En effet, compte tenu des données géotechniques et géophysiques disponibles à ce stade, le rocher de fondation serait situé à une altitude profonde au droit des pertuis rive droite, nécessitant de facto la mise en œuvre d'une grande quantité de BCR. Ce point devra être confirmé au stade PRO et fera l'objet d'investigations complémentaires.

6.1.2. Seuil de l'évacuateur de crues

Le seuil sera monté au niveau de retenue normale du barrage soit 943 m NGF. Cette disposition implique une démolition très partielle de la crête en maçonnerie au droit du seuil de moins de 1.00 m de hauteur. Afin d'éviter l'endommagement de la structure, qui sera conservée pour l'ouvrage définitif, la découpe sera réalisée par sciage au câble diamanté.

6.1.3. Comblement des pertuis existants

Le comblement des pertuis existants est prévu à l'issue de la construction du nouvel évacuateur de crue central, avec la mise en place d'un béton de masse de comblement sur toute la hauteur et sur toute la longueur de chaque pertuis. Dans la mesure où une réhausse de l'ouvrage est prévue et que celle-ci s'appuiera sur le béton de comblement des pertuis, un bétonnage de la largeur complète (4 m) des pertuis est envisagé à ce stade AVP.

L'intérêt de la mise en place d'un BCR plutôt que d'un béton de masse pourra être étudié en stade ultérieur (PRO), si la solution de réhausse est retenue.

6.1.4. Réhausse du barrage en BCR

A ce stade AVP la réhausse du barrage sera réalisée en BCR, suivant le même principe que la recharge aval :

- Mise en œuvre par couches successives d'environ 0.30 m de hauteur ;
- Utilisation d'un coulis de ciment pour enrichir les faces amont, aval et supérieure.

Les garde-corps et parapets seront mis en dépôt préalablement à la réhausse du barrage puis reposés à l'issue des travaux.

6.1.5. Dimensionnement du bassin de dissipation

Le dimensionnement du bassin de dissipation est réalisé d'après la méthode de Boes & Minor. Pour le calcul, seule l'énergie résiduelle laissée après la dissipation d'énergie sur les marches aval de la recharge en BCR est considérée. Ainsi, sur les 24 m de dénivelé entre la crête du seuil au niveau 943.00 m NGF et le fond du bassin situé à la côte 918.10 m NGF, les calculs fournissent les résultats suivants :

- Largeur du bassin : 20 m ;
- Energie dissipée : 16.75 m ;
- Energie résiduelle : 8.40 m ;
- Niveau aval : 921.66 m NGF ;
- Fond du bassin de dissipation : < 918.13 m NGF ;
- Hauteur de l'écoulement à l'entrée du bassin : $h_1 = 0.32$ m ;
- Vitesse de l'écoulement à l'entrée du bassin : $V_1 = 12.33$ m/s ;
- Hauteur conjuguée aval : $h_2 = 3.01$ m ;
- Vitesse de l'écoulement après ressaut : $V_2 = 1.33$ m/s ;
- Longueur du bassin : $4.h_2 = 12.10$ m ;

La dalle du bassin de dissipation, d'une épaisseur de 1 m, peut en théorie supporter l'écoulement sans autre disposition supplémentaire. Néanmoins, compte tenu de l'aspect dynamique et turbulent de l'écoulement, et afin d'éviter tout phénomène de vibration, la dalle est prévue ancrée dans la fondation par l'intermédiaire de clous d'ancrage d'une longueur de 2.00 m disposés à raison d'un clou tous les 3.00×3.00 m².

6.1.6. Etude de stabilité

La justification de la stabilité du barrage a été réalisée pour deux plots de plus grande hauteur, déversant ou non-déversant, et pour plusieurs cas de charges :

- Situation normale N1 ;
- Situation rare de défaillance du drainage R1 ;
- Situation exceptionnelle de crue R2 ;
- Situation rare de crue de chantier R3 ;
- Situation accidentelle sismique E1 ;
- Situation extrême de crue E2.

Le détail de la justification est fourni en Annexe F. Seuls sont rappelés ci-après les principaux résultats vis-à-vis des critères des recommandations du Comité Français des Barrages et Réservoirs pour la justification de la stabilité des barrages-poids.

Le confortement et la réhausse de l'ouvrage prévus permettent de satisfaire l'ensemble des critères de stabilité rappelés ci-après.

Tableau 8 – Vérification des critères de stabilité – Barrage avec réhausse – Profil non-déversant

Situation de projet	Etat-limite d'extension des fissures		Etat-limite de résistance à l'effort tranchant		Etat-limite de flottaison	
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère
N1	0%	0%	1,30	>1	334%	>15%
R1	0%	<25%	1,44	>1	214%	>5%
R2	0%	<25%	1,40	>1	193%	>5%
R3	0%	<25%	1,08	>1	166%	>5%
E1	0%	<100%	1,13	>1	317%	>0%
E2	0%	<100%	1,40	>1	139%	>0%

Tableau 9 – Vérification des critères de stabilité – Barrage avec réhausse – Profil déversant

Situation de projet	Etat-limite d'extension des fissures		Etat-limite de résistance à l'effort tranchant		Etat-limite de flottaison	
	Résultat	Critère	Résultat	Critère	Résultat	Critère
N1	0%	0%	1,24	>1	319%	>15%
R1	0%	<25%	1,36	>1	202%	>5%
R2	0%	<25%	1,33	>1	183%	>5%
R3	0%	<25%	1,01	>1	155%	>5%
E1	11%	<100%	1,08	>1	301%	>0%
E2	0%	<100%	1,51	>1	183%	>0%

6.2. PHASAGE DE CONSTRUCTION

6.2.1. Principe du phasage : priorité à la ressource en eau

Durant la vidange du lac de la Lauch, le soutien des étiages de la rivière Lauch sera assuré uniquement à partir des eaux du lac du Ballon. Le Maître d'Ouvrage impose de pouvoir rétablir dès que possible un soutien du débit de la rivière à partir des eaux du lac de la Lauch, y compris pendant la phase de travaux.

Ainsi il est proposé de **regrouper sur la première année toutes les étapes nécessitant la vidange complète** de la retenue. Cette période appelée « phase critique » devra être la plus courte possible.

Principe général de remise en eau partielle du barrage dès que possible durant les travaux : À la fin de cette « phase critique », au terme des travaux d'aménagement de la galerie de vidange et la construction partielle de la recharge en BCR, un second pertuis en rive gauche en crête sera ouvert à la cote 937.00 m NGF, similaire à celui existant en rive droite. Cette option permet, après l'ouverture de ce second pertuis, de remplir partiellement la retenue jusqu'à la cote 937.00 m NGF, cote à confirmer en phase PRO suivant l'analyse de la mobilisation mécanique de la recharge partiellement érigée, et d'ainsi assurer le soutien des étiages de la rivière (et indirectement l'alimentation en eau potable de la vallée de Guebwiller) sans impacter le niveau de sûreté de l'ouvrage vis-à-vis des crues.

6.2.2. Phase 0 : vidange, installation de chantier et gestion des eaux

La vidange s'effectuera entre début février et fin mars de la première année de travaux et sera très progressive afin de limiter les impacts sur l'environnement et la diffusion à l'aval dans le cours d'eau de sédiments. Des dispositifs anti-sédiments seront par ailleurs mis en place dans le cours d'eau à l'aval du barrage et une pêche de sauvegarde sera organisée et les poissons pêchés seront remis dans la partie amont du lac, maintenue en eau par la digue batardeau.

Un batardeau amont de protection du chantier sera réalisé, si possible en partie à l'avancée dans l'eau en fin de vidange dès que le plan d'eau sera à un niveau suffisant et inférieur à 927 m NGF sur l'ancienne digue pré-existante, réhaussée de quelques mètres de hauteur. Cela permettra éventuellement de gagner une à deux semaines sur la durée de la « phase critique ».

Le remblai sera constitué de matériaux du lac et éventuellement de matériaux d'un autre site. Il sera renforcé en surface et doté d'organes hydrauliques minimalistes type vanne(s) et buses pour assurer une régulation minimale, et un déversoir de crue en enrochements secs (crue de référence de chantier à déterminer en phase PRO).

Début avril, la vidange complète de la retenue sera réalisée (mise à sec du pied amont de l'ouvrage). Un volume d'eau sera maintenu à l'amont du batardeau de chantier pour préserver la faune aquatique.

A ce stade AVP, la maîtrise des eaux et le dimensionnement des conduites d'évacuation sont laissés à l'initiative de l'Entreprise qui sera chargée des travaux pendant le chantier (notamment pour la dérivation des eaux lors de la démolition de la galerie de vidange et de la construction de la nouvelle galerie de restitution). Il a toutefois été vérifié que deux conduites provisoires de diamètre Ø500, mises en place depuis le pied aval du batardeau jusqu'à l'aval du barrage, permettent le transit d'environ 0.5 m³/s chacune à travers le pertuis de vidange de fond entièrement dégagé et sous des charges hydrostatiques compatibles avec la réalisation d'un batardeau en terre.

6.2.3. Phase 1 : démolition et vidange de fond

Les travaux à réaliser en phase 1 suite à la vidange de la retenue sont les suivants, classés dans l'ordre d'exécution :

5. Réalisation en parallèle de la phase 0 des installations de chantier. A des fins de respect du planning général, les installations débutent à l'issue du 2^{ème} mois des études d'exécution. Cette hypothèse est cohérente avec la possibilité pour l'Entreprise de prioriser les études relatives aux installations de chantier pour leur validation à l'issue du 2^e mois. L'Entreprise pourra ensuite continuer parallèlement aux installations de chantier la réalisation des études relatives à l'exécution du reste des travaux ;
6. Réalisation en parallèle :
 - Du démantèlement de la recharge existante (en concomitance avec la construction du batardeau / phase 0) et démolition de la galerie de vidange existante depuis l'aval du barrage ;
 - Du démantèlement des vannes de prise d'eau et de vidange existantes et de la tuyauterie afférente depuis l'amont, puis du réalésage de la galerie de vidange depuis l'accès amont ainsi créé ;
 - De l'inspection de la maçonnerie, de son rejointoiement, et de la réalisation éventuelle d'injection depuis la crête ou les parements.
7. Réalisation en parallèle :
 - De la mise en œuvre de la recharge BCR jusqu'à la cote 922.00 m NGF, puis du forage des drains en fondation de la galerie de vidange ;
 - Du bétonnage de la galerie de vidange de fond. Cette étape s'effectue d'abord en galerie au sein du barrage en maçonnerie, puis au droit de la recharge en BCR une fois celle-ci réalisée.

Ainsi, la conduite de prise d'eau existante et les vannes seront démantelées au début du chantier afin de laisser l'intégralité de la section du pertuis disponible pour l'écoulement d'eau. La capacité de ce pertuis sans mise en charge (cote de 922.50 m NGF) est de l'ordre de 0.22 m³/s, alors que le module interannuel du cours d'eau est de 0.08 m³/s. Ce pertuis pourra accueillir les débits courants à surface libre, ou les débits des conduites d'évacuation en charge suivant les phases de chantier.

Pour des débits supérieurs, pendant la phase 1, les dispositions suivantes sont envisagées :

- Avec une élévation du plan d'eau à la cote 937.00 m NGF, le pertuis de vidange existant permet l'évacuation de 8.4 m³/s ;
- Avec une élévation du plan d'eau supérieure à la cote 937.00 m NGF, l'eau sera évacuée en partie par le pertuis de vidange, et en partie par le pertuis d'évacuation des crues existant en rive droite, dont le seuil est à 937.00 m NGF. La capacité d'évacuation de ces deux ouvertures est de 27 m³/s sous la cote 938.40 m NGF, correspondant au débit de pointe de la crue centennale. La stabilité du barrage en maçonnerie sans recharge est justifiée pour cette cote (voir Annexe E).

Avec l'évacuation de la recharge existante, les coursiers existants n'assureront plus leur fonction. L'eau déversera donc en cas de crue, depuis le pertuis, sur la maçonnerie et le fond de fouille mis à nu par l'excavation. Aussi, après l'excavation et sur avis d'un géologue, le fond de fouille sera bétonné afin d'éviter l'affouillement en pied aval du barrage en cas de crue.

6.2.4. Phase 2 : galerie de drainage et érection de la recharge BCR

Les travaux à réaliser en phase 2 sont les suivants, classés dans l'ordre d'exécution :

8. Bétonnage sur place du radier la galerie de vidange. Il est prévu pour cette étape sur le chemin critique, la réalisation du radier par 2 ateliers en parallèle, par plots alternés : par exemple bétonnage des plots du radier n°1 et n°3, puis des plots n°2 et n°4, etc. Le bétonnage du radier se finira par les plots à la connexion avec la vidange de fond, de manière à continuer le bétonnage de la vidange de fond (phase 1) en parallèle.
9. Mise en œuvre de la recharge BCR jusqu'à la cote 924.50 m NGF ;
10. Mise en place des dalles préfabriquées constituant le toit de la galerie de drainage ;
11. Réalisation en parallèle :
 - De la mise en œuvre de la recharge BCR jusqu'à la cote 930.00 m NGF ;
 - De l'ouverture d'un pertuis en rive gauche à la cote 937.00 m NGF, puis de l'obturation amont du pertuis de vidange de fond avec mise en place des vannes.

Cette seconde phase se termine par l'ouverture d'un pertuis en rive gauche, calé à la cote 937.00 m NGF, sur le modèle de celui existant en rive droite, puis l'obturation du pertuis de vidange la mise en service des vannes. Le remplissage partiel de la retenue peut être envisagé jusqu'à la cote 937.00 m NGF, cote à confirmer en phase PRO suivant l'analyse de la mobilisation mécanique de la recharge. Le protocole de remplissage sera également à établir au stade PRO.

À l'issue de cette phase 2, en cas de crue, les débits sont évacués par les deux pertuis de crête calés à la cote 937.00 m NGF. L'eau déverse depuis les pertuis, sur la maçonnerie et le fond de fouille bétonné afin d'éviter l'affouillement en pied aval du barrage. La capacité d'évacuation de ces deux pertuis de crête est de 36 m³/s sous la cote 938.40 m NGF, supérieure donc au débit de pointe de la crue centennale.

Il est prévu que la phase 2 se termine au plus tard en novembre 2024. Si l'hiver est rude (températures inférieures à 5°C et/ou pluie), le montage du BCR n'est pas possible. Une interruption de chantier est donc possible et a été planifiée entre les phases 2 et 3.

6.2.5. Phase 3 : nouvel évacuateur de crues et fin de la recharge BCR

Les travaux à réaliser en phase 3 sont les suivants, classés dans l'ordre d'exécution :

1. Réalisation en parallèle :
 - Du sciage de la partie supérieure du barrage pour la création du futur évacuateur ;
 - De la mise en œuvre de la recharge BCR ;

- Du décapage de la crête du barrage et des traitements divers en vue de la réhausse (dépose des garde-corps et des perrés, etc.).

2. Réalisation en parallèle :

- Du bétonnage du seuil et des bajoyers de l'évacuateur de crues ;
- De la finalisation de la mise en œuvre de la recharge BCR jusqu'à la cote 942.00 m NGF puis de la réalisation des drains.

Cette étape se conclue avec la mise en service du nouvel évacuateur de crues.

Durant cette phase 3, les travaux connexes associés à la réhausse du barrage pourront être réalisés, tels que la réhausse d'une portion de la route départementale en rive gauche, la réhausse de la piste forestière en rive droite, la réalisation d'un local technique d'exploitation en rive gauche, la recharge et le reprofilage des sentiers piétons, etc. Ces opérations n'étant pas sur le chemin critique, elles pourront être décalées au besoin.

Au cours de la phase 3, en cas de crue, les débits sont évacués par les deux pertuis de crête calés à la cote 937.00 m NGF. L'eau déverse depuis les pertuis, sur la maçonnerie et le fond de fouille bétonné afin d'éviter l'affouillement en pied aval du barrage. La capacité d'évacuation de ces deux pertuis de crête est de 36 m³/s sous la cote 938.40 m NGF, supérieure donc au débit de pointe de la crue centennale.

6.2.6. Phase 4 : réhausse du barrage

Les travaux à réaliser en phase 4 sont les suivants, classés dans l'ordre d'exécution :

1. Obturation des pertuis existants, sur toute largeur afin de supporter la réhausse ;
2. Mise en œuvre de la réhausse en BCR ;
3. Réalisation en parallèle :
 - De la pose des garde-corps ;
 - De l'installation de la passerelle au-dessus de l'évacuateur de crues ;
 - De l'installation du dispositif d'auscultation. Cette étape peut être anticipée et réalisée par exemple en grande partie en parallèle de l'obturation des pertuis existants. Seuls les dispositifs étant liés à la crête l'ouvrage définitif devront être réalisés après réhausse du barrage.
4. Remise en état du site et démobilisation.

Au cours de la phase 4, après obturation des pertuis et en cas de crue, les débits sont évacués par le nouvel évacuateur de crues en service, calé à la cote 943.00 m NGF. L'eau déverse depuis le seuil sur le coursier et le bassin de dissipation. La capacité d'évacuation du nouvel évacuateur est de 80 m³/s sous la cote 944.10 m NGF, correspondant donc à la capacité d'évacuation finale du barrage conforté (cote PHE).

6.2.7. Synthèse

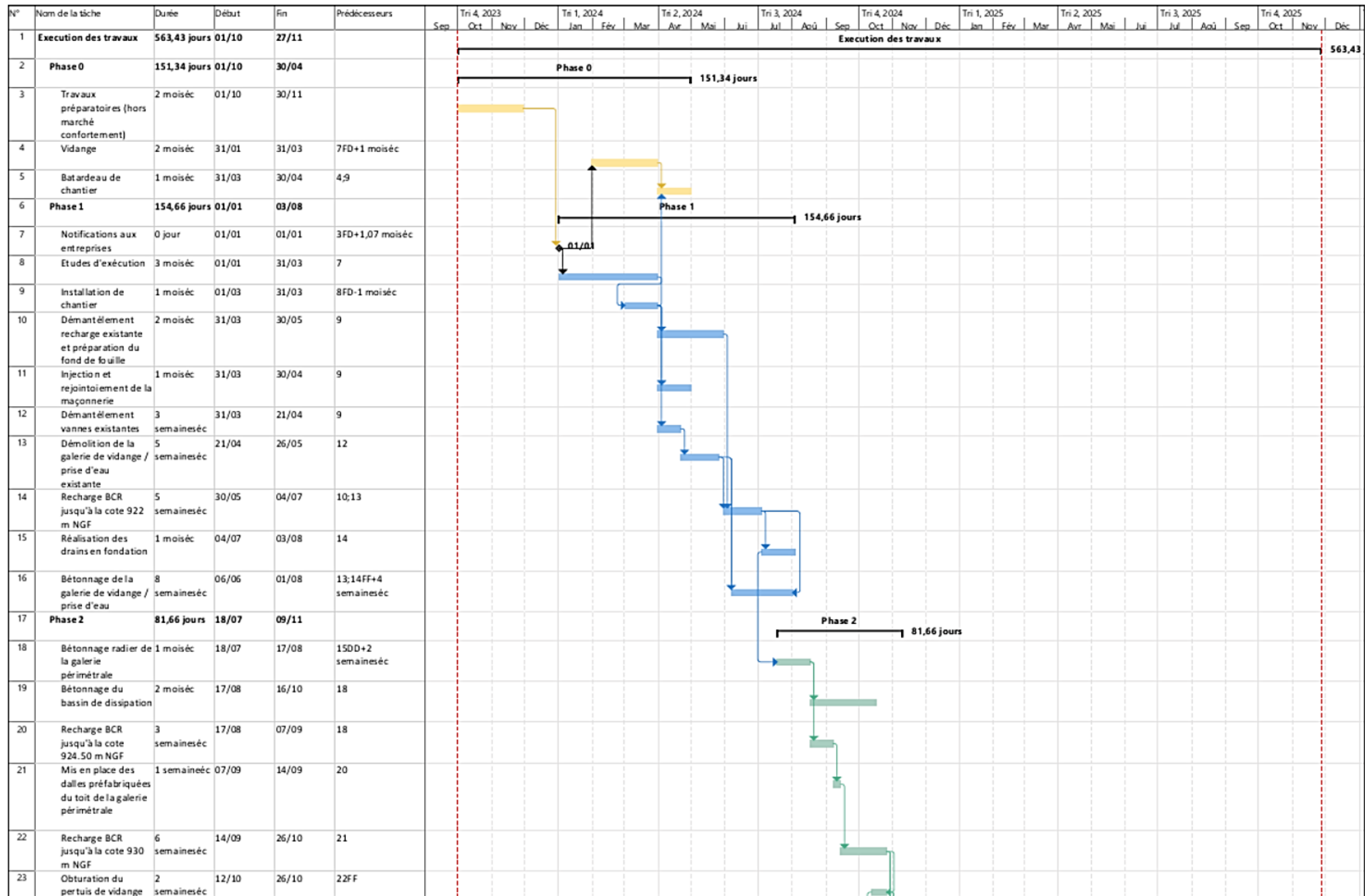
Le tableau ci-dessous précise les travaux réalisés et les modalités d'évacuation des crues sur l'ouvrage au cours de chacune des phases :

Tableau 10 – Synthèse du phasage de construction – solution technique sans réhausse

Phase	Travaux principaux	Cote de retenue (hors crue)	Modalité d'évacuation des crues
0 – Etat actuel / Vidange et dérivation provisoire	<ul style="list-style-type: none"> Vidange Création du batardeau Dérivation provisoire 	≤ 937.00 m NGF	<ul style="list-style-type: none"> 1 pertuis rive droite à la cote 937.00 m NGF 3 pertuis à la cote 940.00 m NGF
1 – Démolition et vidange de fond	<ul style="list-style-type: none"> Décapage de la recharge existante Réalisation de la recharge en BCR jusqu'à la cote 922.00 m NGF Travaux de génie civil relatifs à la galerie de vidange 	Retenue à sec, évacuation du débit courant par le pertuis de vidange	<ul style="list-style-type: none"> Pertuis de vidange 1 pertuis rive droite à la cote 937.00 m NGF Surverse sur maçonnerie et fond de fouille bétonné pour éviter l'affouillement Débit évacuable 27 m³/s = Q100 à la cote 938.40 m NGF
2 – Galerie de drainage et recharge BCR	<ul style="list-style-type: none"> Galerie de drainage Réalisation de la recharge en BCR jusqu'à la cote 930.00 m NGF Bassin de dissipation Travaux relatifs aux éléments hydromécaniques de la galerie de vidange Ouverture d'un pertuis en RG 	Retenue à sec, évacuation du débit courant par le pertuis de vidange	<ul style="list-style-type: none"> Pertuis de vidange 1 pertuis rive droite à la cote 937.00 m NGF Surverse sur maçonnerie et fond de fouille bétonné pour éviter l'affouillement Débit évacuable 27 m³/s = Q100 à la cote 938.40 m NGF
3 – Evacuateurs de crues et finalisation de la recharge BCR	<ul style="list-style-type: none"> Seuil et bajoyers de l'évacuateur de crues Réalisation de la recharge en BCR jusqu'à la cote 942.00 m NGF 	≤ 937.00 m NGF	<ul style="list-style-type: none"> 1 pertuis rive droite et 1 pertuis rive gauche à la cote 937.00 m NGF Surverse sur maçonnerie et fond de fouille bétonné pour éviter l'affouillement Débit évacuable 36 m³/s > Q100 à la cote 938.40 m NGF
4 – Réhausse du barrage	<ul style="list-style-type: none"> Obturation des pertuis Réalisation de la réhausse en BCR jusqu'à la cote 945.00 m NGF 	≤ 937.00 m NGF jusqu'à l'obturation des pertuis puis ≤ 943.00 m NGF	<ul style="list-style-type: none"> Inchangée par rapport à la phase 3 jusqu'à l'obturation des pertuis Après obturation des pertuis : <ul style="list-style-type: none"> Nouvel évacuateur de crues frontale Débit évacuable 80 m³/s = Q10000 à la cote 944.10 m NGF

6.3. PLANNING PREVISIONNEL DE CONSTRUCTION

Le planning prévisionnel de construction est détaillé ci-après.



6.4. INSERTION PAYSAGERE

6.4.1. Recharge de finition

Dans les études précédentes (2012-2021) de confortement du barrage, une recharge de finition supplémentaire était envisagée par-dessus le parement de la recharge aval en BCR. L'objectif était de limiter l'impact visuel de la nouvelle recharge aval en BCR par rapport au visuel rustique du barrage actuel. Cela permettait également le réemploi des matériaux issus de la démolition de la recharge actuelle.

La mise en œuvre d'une telle recharge est sujet à discussion. En effet :

- Les volumes disponibles de matériaux de la recharge actuelle sont à ce stade incertains. En outre, ceux-ci pourront être préférentiellement réutilisés pour l'aménagement de zones de mesures compensatoires (voir §4.12). Suivant les volumes disponibles, l'intérêt environnemental de la création de la recharge de finition serait drastiquement réduit puisqu'elle pourrait nécessiter le transport de matériaux d'apport plutôt que le réemploi de matériaux issus de la démolition de la recharge actuelle ;
- Les matériaux de la recharge de finition nécessitent une mise en œuvre suivant des pentes relativement douces. Cette recharge ajoute donc à l'ouvrage une masse significative dont l'effet sur le comportement dynamique du barrage en cas de séisme, déterminé au stade PRO par le biais de calculs dynamiques temporels, pourrait être négatif et nécessiter sa réduction de hauteur (diminuant de facto l'intérêt paysager d'une telle recharge puisque la recharge en BCR deviendrait partiellement apparente) ou sa suppression ;
- En cas de réhausse et d'un remplissage du réservoir à RN, seule la partie réhaussée en béton sera visible depuis l'amont ;

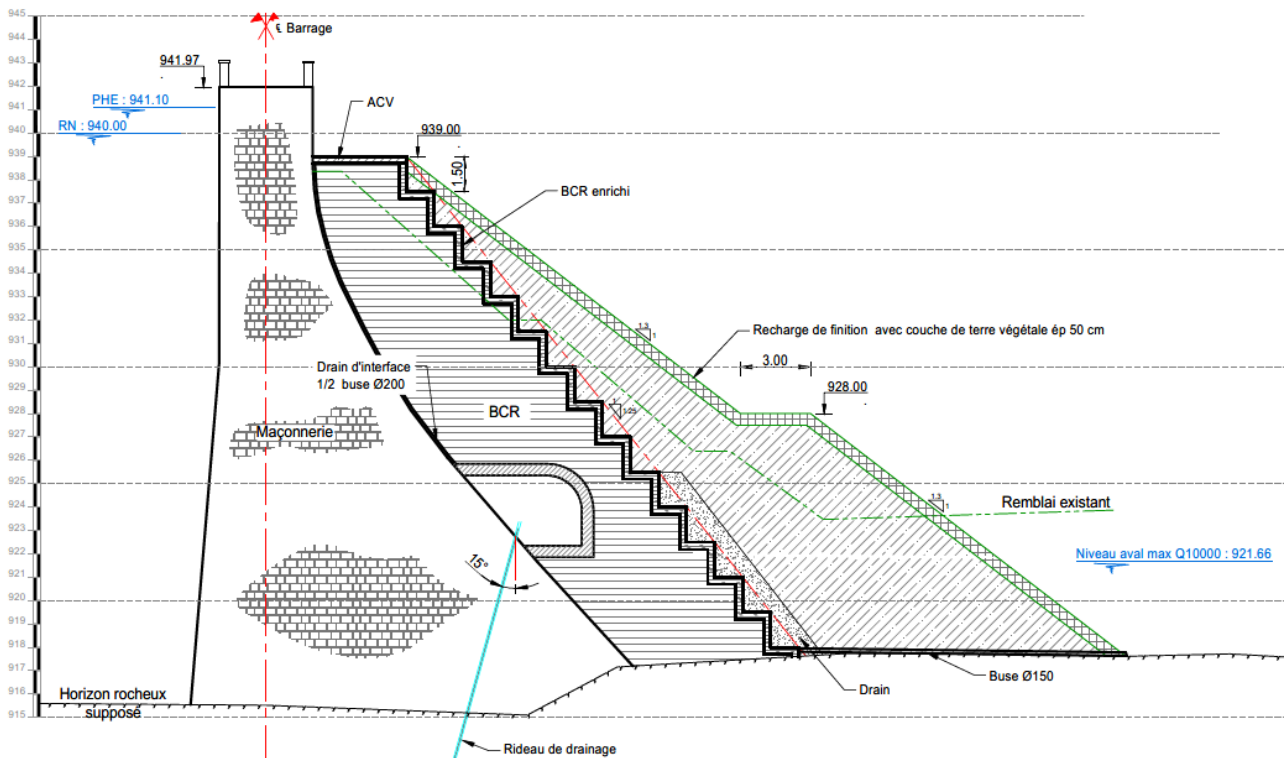


Figure 22 - Illustration de la recharge aval de finition lors des études antérieures (dossier CTPBOH 2021)

- Le parti pourrait être pris d'ancrer l'aspect aval de l'ouvrage dans la modernité, avec un visuel de parements béton apparents. En effet, le visuel de la partie centrale aval du barrage sera constituée majoritairement de béton

apparent avec le seuil, le coursier et les bajoyers de l'évacuateur de crues. En outre, et dans le cas d'une réhausse du barrage, la recharge aval BCR s'élèvera jusqu'au niveau actuel de la crête soit 943.00 m NGF. La crête de l'ouvrage visible depuis l'aval sera donc intégralement constituée de béton, nonobstant la présence d'une recharge de finition.

A ce stade, le Maître d'Ouvrage indique ne pas souhaiter mettre en œuvre une recharge de finition.

6.4.2. Parements en béton

Sur les parties modernes qui seront issues des travaux sur le barrage, il pourrait être envisagé les mesures suivantes, à inscrire au sein des documents de consultation des Entreprises, pour l'intégration paysagère des travaux de confortement et de réhausse du barrage :

- Imposer une teinte du béton mis en œuvre, à minima sur les parements, avec notamment la réalisation de planches d'essais à valider par le Maître d'Ouvrage ;
- Imposer côté amont la mise en œuvre d'un parement maçonné pour la réhausse de l'ouvrage, après identification d'une carrière appropriée, ou imposer la mise en œuvre de parement en béton matricé. Cette technique consiste en la mise en œuvre de coffrages spéciaux dont l'intérieur est engravé afin de reproduire le motif d'un parement maçonné. Elle présente l'avantage d'être moins onéreuse que la mise en œuvre d'un parement de pierres maçonnées.





Figure 23 - Exemples de parement en béton matricé du coursier d'un évacuateur de crues

A ce stade, aucun des choix présentés ci-avant n'est intégré dans l'estimation financière présentée ci-après. Ces approches seront approfondies en cours de la phase suivante (PRO).

7. ESTIMATION FINANCIERE DES TRAVAUX

Le Détail Quantitatif Estimatif des deux solutions de confortement est fourni en Annexe G.

Les quantités sont établies sur la base des métrés issus du dossier de plans joint à ce rapport d'Avant-Projet.

Les coûts par ouvrage sont détaillés ci-après pour les solutions avec et sans réhausse ; ils sont présentés par ensemble cohérent, et arrondis. Il est à noter que les coûts associés à la démolition des bâtiments à l'aval rive gauche du barrage sont exclus du présent AVP et sont laissés vierges.

Tableau 11 – Estimation financière des travaux (H.T.)

Ouvrage	Barrage sans réhausse	Barrage avec réhausse
Travaux préliminaires	1 045 000 €	1 760 000 €
Recharge aval	5 170 000 €	7 370 000 €
Vidange de fond, prise d'eau et galerie de drainage	1 160 000 €	1 170 000 €
Evacuateur de crues bassin de dissipation et chenal d'évacuation	745 000 €	730 000 €
Barrage et pertuis latéraux	165 000 €	1 235 000 €
Travaux annexes	155 000 €	175 000 €
Mesures environnementales	900 000 €	1 500 000 €
Divers et aléas	1 685 000 €	2 490 000 €
Etudes de conception du projet	560 000 €	835 000 €
Total général (H.T.)	11 585 000 €	17 265 000 €

On observe une nette augmentation des coûts des différents éléments de base du confortement par rapport aux études précédentes (estimation en mars 2021 à 6 millions d'euros HT de travaux hors aléas et maîtrise d'œuvre pour une solution équivalente à la variante sans réhausse). Le surcoût de la réhausse est affiné et légèrement inférieur aux estimations de la phase précédente d'étude préliminaire.

L'augmentation des travaux de base du confortement du barrage s'explique au regard des points suivants :

- Les coûts unitaires affichés dans le présent DQE correspondent à une estimation sur la base de nos projets similaires en France les plus récents de ces derniers mois. Compte tenu du contexte d'inflation économique forte, additionné à des difficultés (et donc des coûts) d'approvisionnement actuels en matières premières, des fortes augmentations des prix ont été observé récemment constatées, notamment pour l'exécution des bétons. Il est à noter que ces prix ont fait l'objet d'une consolidation auprès d'acteurs importants du domaine la construction afin d'obtenir des coûts unitaires les plus représentatifs possibles de l'état du marché actuel ;
- Le DQE comprend désormais une intégration du coût des mesures compensatoires d'un montant de 900 000 € et 1 500 000 € respectivement pour les solutions sans et avec réhausse ;
- La provision justifiée pour aléas au stade AVP des études d'avant-travaux. En effet une attention particulière doit être portée au fait que le niveau du toit rocheux sous la recharge existante n'est pas connu avec précision. A ce stade, la profondeur du toit rocheux a été estimé sur la base des résultats des reconnaissances géophysiques réalisées à l'aval, extrudés dans la direction amont-aval et recalés ponctuellement par les informations issues des forages. Il en résulte une forte variabilité du niveau de fondation d'une rive à l'autre. Ces hypothèses jouent un rôle primordial dans l'estimation des quantités de matériaux à excaver, et surtout dans les quantités de BCR à mettre en œuvre. La mise en œuvre du BCR de la recharge aval représente une part significative du chiffrage global (~35-40%). La provision pour aléas a donc été ajustée en cohérence avec le niveau d'étude et ces incertitudes ;

8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

8.1. COMPATIBILITE DES VARIANTES DE CONFORTEMENT

Les deux variantes de confortement du barrage de la Lauch, avec ou sans réhausse du barrage, développée au sein du rapport d'AVP permettent de satisfaire l'ensemble des critères de conception et de justification de la stabilité du barrage, notamment vis-à-vis des crues extrêmes et du séisme de référence.

La réalisation d'une réhausse de 3 m de la crête de l'ouvrage permet une augmentation de 75% du volume exploitable du lac de la Lauch. Cette réhausse renforcerait donc la stratégie actuelle de gestion des étiages de la rivière à partir des deux barrages de la Lauch et du Ballon, avec un lac du Ballon en relais au lac de la Lauch en tant que réserve ultime (son taux de renouvellement étant nettement moins performant que celui du lac de la Lauch).

Les surcoût liés à la réalisation de la réhausse sont estimés au stade AVP à environ 5 68 000 € H.T., pour un coût total de confortement et de rehausse du barrage estimé à 17 265 000 € H.T. Les délais associés sont compatibles avec les contraintes de planning de travaux limités à 2 années, en intégrant l'objectif de minimisation de la durée critique de vidange du barrage (maximum un an). La réalisation de la réhausse du barrage induit un allongement de la durée des travaux estimé à 3 mois, dans le respect des critères de planning mentionnés ci avant.

8.2. BESOINS EN ETUDES COMPLEMENTAIRES

8.2.1. Besoin communs aux deux variantes

Les besoins en études complémentaires identifiés sont définis ci-dessous. Ces études seront détaillées dans le cadre de cahiers des charges dédiés :

- **Reconnaitances géophysiques et géotechniques :**
 - Réalisation d'investigations géophysiques en crête de l'ouvrage par le biais d'un profil de sismique réfraction et de MASW (P1). L'objectif de ces investigations est de définir le niveau d'homogénéité du barrage en maçonnerie et de déterminer la position du contact barrage / fondation d'une rive à l'autre ;
 - Réalisation de 2 profils de sismique réfraction en pied d'ouvrage afin de déterminer la position du toit du rocher sous la « fouille aval », au droit de l'emprise du bassin de dissipation projeté ;
 - Réalisation de 10 forages carottés au sein du barrage et de la recharge en remblai, complétés par une imagerie de parois. Les objectifs sont multiples :
 - Confronter et ajuster les résultats issus des investigations géophysiques pour la détermination de l'interface barrage / fondation au droit du barrage en maçonnerie ;
 - Confirmer ou infirmer la présence d'un éperon rocheux en rive droite du barrage, dont l'existence est soupçonnée sur la base des investigations géophysiques réalisées à l'aval du barrage en 2006 ;
 - Compléter la détermination de la géométrie des contacts recharge / fouille aval et fouille aval / fondation en rives droite et gauche. En effet, les reconnaissances géotechniques réalisées jusqu'ici sont principalement concentrées en partie centrale du barrage ;
 - Effectuer des prélèvements de maçonnerie intacte afin de réaliser une analyse statistique de la densité de la maçonnerie : ensemble blocs + mortier et non chaque élément séparément ;
 - Effectuer des prélèvements dans les matériaux de la recharge aval et de la fouille aval pour des analyses chimiques complémentaires.
- **Absence de pollution dans la recharge existante :** Réalisation d'analyses sur les matériaux de la recharge aval de type équivalent à une admission en Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI), par analogie aux analyses réalisées sur les sédiments de la retenue. L'objectif de ces analyses est d'étudier la présence d'éventuels polluants

dans les matériaux de la recharge et de confirmer leur possible réutilisation en tant que matériaux pour la construction du batardeau ou la réalisation des mesures compensatoires en amont de la retenue.

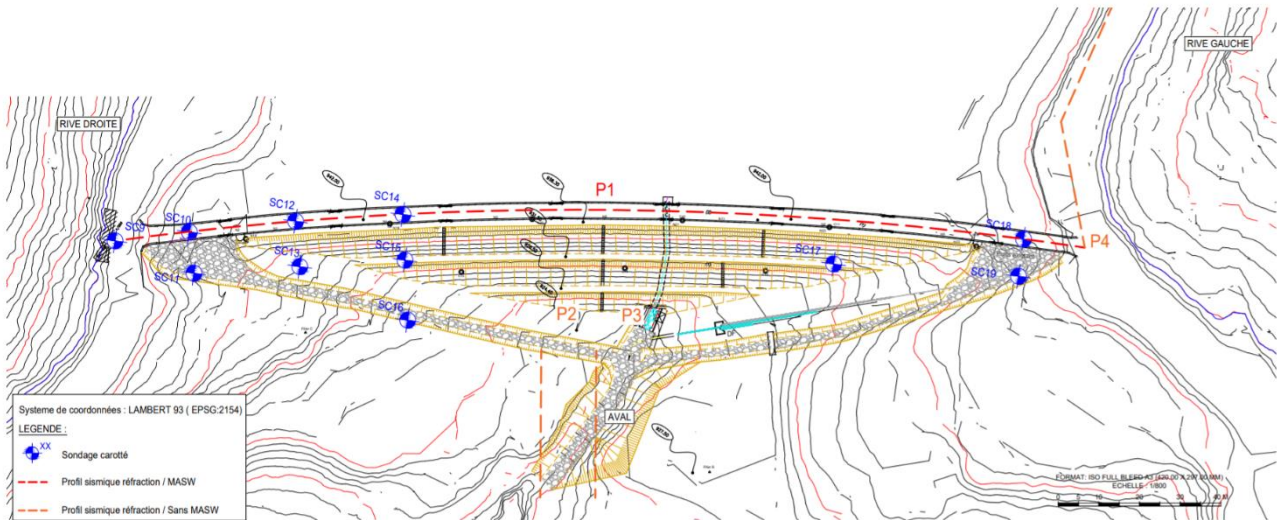


Figure 24 - Schéma de principe de l'implantation des reconnaissances géophysiques et géotechniques complémentaires

8.2.2. Besoins spécifiques à la variante avec réhausse

Les besoins en études complémentaires spécifiques à la variante avec réhausse sont définis ci-dessous. Ces études seront détaillées dans le cadre de cahiers des charges dédiés :

- Réalisation d'essais Matsuo autour du réservoir pour s'assurer de l'étanchéité du terrain au-dessus de la cote de RN historique de 940.00 m NGF ;
- Réalisation d'essais en laboratoire sur les échantillons prélevés au droit de chaque puits ayant servi aux essais de perméabilité, pour caractériser les sols en place ;
- Réalisation d'un forage carotté additionnel (SC9) en rive droite, en crête du barrage ;
- Des essais de perméabilité (essais Lugeon) sous le contact barrage/fondation et en fondation (P2 et P3).
- Réalisation de deux profils sécants de sismique réfraction en rive gauche du barrage, le long de la route départementale vers l'amont (P4).

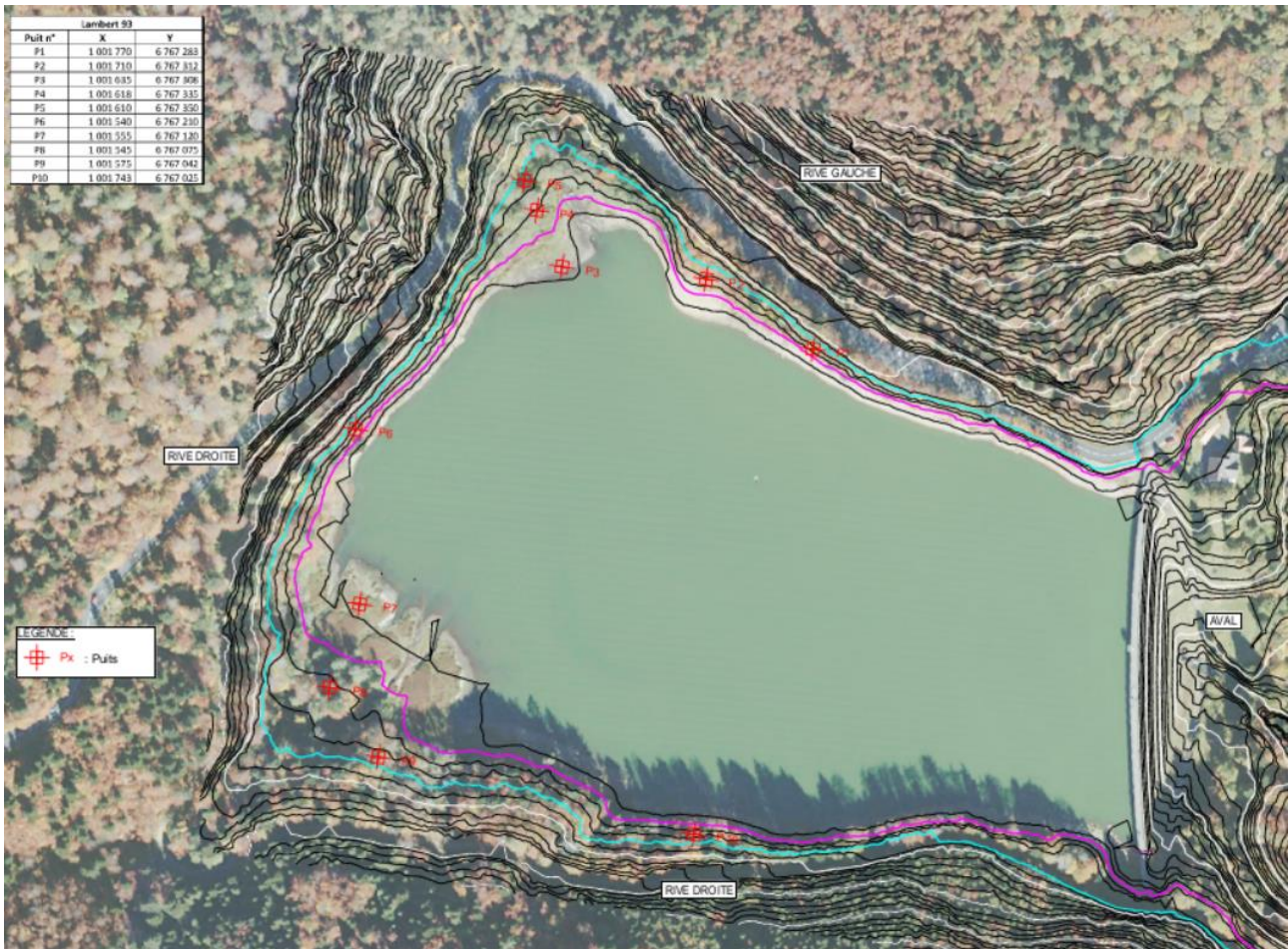


Figure 25 - Schéma de principe de l'implantation des puits pour réalisation des essais de perméabilité

8.3. PISTES D'OPTIMISATION EN PHASE PRO

Plusieurs pistes d'optimisation seront investiguées au stade PRO selon la variante de travaux retenue par le Maître d'Ouvrage, en addition des points demandés par les services de contrôle de l'Etat, dont notamment :

- La réduction du confortement suite la réévaluation des paramètres de résistance à l'interface barrage / fondation sur la base d'une analyse géologique ;
- L'étude du remplacement éventuel d'une recharge BCR par une recharge en Béton Conventionnel Vibré (BCV), afin de s'affranchir des contraintes de mise en œuvre de la recharge (largeur minimum de 5 m) et permettre l'optimisation des quantités ;
- La réduction de la cote d'arase de la recharge aval, sous réserve de validation des contraintes au sein des matériaux en situation sismique ;
- La validation et l'ajustement de la cote maximum du remplissage partiel du réservoir à l'issue de la première année de travaux ;
- La modification de la géométrie de la connexion entre la vidange de fond et l'évacuateur de crue afin d'améliorer le fonctionnement hydraulique de l'ensemble ;
- L'ajustement de la géométrie des marches du parement aval afin d'améliorer la dissipation d'énergie au droit de la section déversante, dans l'objectif de réduire la longueur du bassin de dissipation ;

- La réduction de la section de la vidange de fond, notamment par le biais du remplacement éventuel de l'écoulement à surface libre par une conduite en charge ;
- Le comblement des pertuis latéraux par la mise en place d'un BCR plutôt que d'un béton de masse, si la solution de réhausse est retenue ;
- La mise en œuvre de piles intermédiaires au droit de l'évacuateur de crues afin de réduire la portée de la passerelle de franchissement.