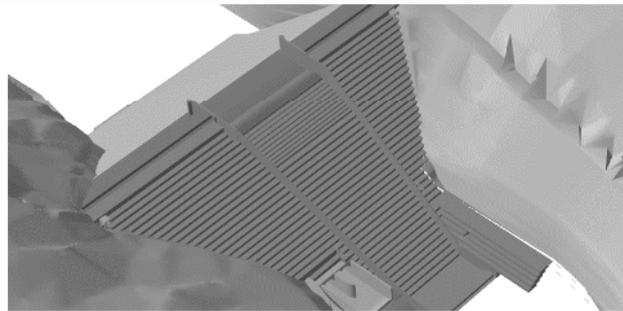




SÉCURISATION DU COMPLEXE HYDRAULIQUE FORMÉ PAR LES BARRAGES DE SAINTE-CÉCILE D'ANDORGE ET DES CAMBOUS

Pièce 9b

DOSSIER D'AUTORISATION ENVIRONNEMENTALE



CHANGER LE SENS
DE VOTRE QUOTIDIEN

GARD.FR

Barrage des Cambous
Rapport d'études de projet (PRO)

SECURISATION DU COMPLEXE HYDRAULIQUE FORME PAR LES BARRAGES DE SAINTE CECILE D'ANDORGE ET DES CAMBOUS

Barrage des Cambous

Rapport d'études de Projet (PRO)



Indice E – Mai 2023

	<p>Maîtres d'œuvre BRL ingénierie 1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5</p>
	<p>ISL Ingénierie SAS – MONTPELLIER 65 rue Clément Ader 34170 - Castelnau-le-Lez</p>
 <p><small>MEDiterranée, Infrastructure, Aménagement, et Eau</small></p>	<p>MEDIAE ZAC de la Petite Camargue, 352 chemin des Oliviers 34400 LUNEL</p>
	<p>Maître d'ouvrage Conseil Départemental du Gard Direction de l'Eau et de la Valorisation du Patrimoine Naturel 3 rue Guillemette 30044 Nîmes Cedex 9</p>

Date du document	26/10/2021
Contact	Julien VANWARREGHEM

Titre du document	Sécurisation du complexe hydraulique formé par les barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous – Barrage des Cambous – Rapport d'études PRO
Référence du document :	A00593_CAM_PRO_ind E
Indice :	E

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérfié et Validé par
12/11/2021	A	Première version	Bastian DIREUR Cyril LAPIERRE Alexandre DORADOUX Akim SALMI	Julien VANWARREGHEM
15/12/2021	B	Prise en compte des remarques du MOA et de l'AMO	Bastian DIREUR	Julien VANWARREGHEM
17/06/2022	C	Prise en compte des remarques de l'AMO	Alexandre DORADOUX	Julien VANWARREGHEM
28/04/2023	D	Prise en compte des remarques de l'AMO et mise à jour de l'estimation financière	Alexandre DORADOUX	Julien VANWARREGHEM
11/05/2023	E	Ajout référence documentaire (cf. §1.4) et mise en cohérence	Alexandre DORADOUX	Julien VANWARREGHEM

SECURISATION DU COMPLEXE HYDRAULIQUE FORME PAR LES BARRAGES DE SAINTE CECILE D'ANDORGE ET DES CAMBOUS

Barrage des Cambous

Rapport d'études de Projet (PRO)

PRÉAMBULE	9
1 CONTEXTE GENERAL	10
1.1 CADRE DE L'OPERATION	10
1.2 OBJET DE LA MISSION	10
1.3 PRESENTATION DU BARRAGE DES CAMBOUS.....	11
1.3.1 Localisation du barrage	11
1.3.2 Géométrie de l'ouvrage	12
1.3.3 Caractéristiques du barrage	13
1.3.4 Chronologie des principaux travaux effectués sur le barrage	14
1.3.5 Dispositifs d'auscultation actuels du barrage	15
1.3.5.1 Dispositif de drainage.....	15
1.3.5.2 Piézomètres.....	16
1.3.5.3 Suivi géomécanique	16
1.3.5.4 Suivi topométrique	17
1.3.5.5 Suivi du plan d'eau et de la température.....	17
1.3.5.6 Fréquences de mesure.....	18
1.3.6 Descriptif de la distribution électrique.....	18
1.3.6.1 Alimentation électrique	18
1.3.6.2 Distribution électrique	18
1.3.6.3 Contrôle commande	18
1.4 DOCUMENTS DE REFERENCE	19
2 DESCRIPTION DES TRAVAUX ENVISAGES	21
2.1 RAPPEL DES RELEVÉS DE DECISIONS ISSUS DE L'AVP	21
2.1.1 Travaux de confortement.....	21
2.1.2 Amélioration des dispositifs d'auscultation	21
2.1.3 Augmentation de la capacité de vidange	22
2.1.4 Vérification de la stabilité de l'ouvrage.....	22
2.2 APPORTS ET MODIFICATIONS MAJEURES DE LA PHASE PRO.....	22
2.3 RECONNAISSANCE DU FOND DE LA FOSSE AVAL ET ÉTUDE GEOTECHNIQUE G3.....	23
2.4 ANALYSE COMPLÉMENTAIRE DU RISQUE D'ÉROSION EN AVAL RIVE GAUCHE DU BARRAGE.....	23
2.4.1 Analyse du risque d'érosion au pied du barrage en rive gauche	23

2.4.1.1	Calcul de la puissance surfacique corrigée.....	23
2.4.1.2	Analyse de l'érodabilité aval.....	27
2.4.1.3	Conclusions sur l'érodabilité	29
2.5	TRAVAUX DE CONFORTEMENT.....	30
2.5.1	Confortement du massif de butée rive droite	30
2.5.2	Confortement de la fosse aval.....	32
2.5.2.1	Fosse aval Rive Droite	32
2.5.2.2	Fosse aval Rive Gauche	33
2.5.3	Travaux divers.....	34
2.6	AMELIORATION DES DISPOSITIFS D'AUSCULTATION	35
2.6.1	Pour le suivi de la déformation du barrage	36
2.6.1.1	Pendule inversé en pied de barrage	36
2.6.1.2	Vinchons.....	39
2.6.2	Pour le suivi des pressions interstitielles	40
2.6.2.1	Piézomètres.....	40
2.6.2.2	Cellules de pressions interstitielles.....	42
2.6.2.3	Réseaux de drains complémentaires/supplémentaires	44
2.6.2.4	Collecteurs et déversoir triangulaire à parois minces	50
2.7	DECONSTRUCTION/RECONSTRUCTION DE LA CHAMBRE AVAL	54
2.7.1	Démolition	54
2.7.2	Reconstruction de la chambre aval	55
2.7.2.1	Génie civil.....	55
2.7.2.2	Divers et équipements.....	56
2.7.2.2.1	Treuil monorail.....	56
2.7.2.2.2	Trappe et étanchéité de la dalle de couverture.....	57
2.7.2.2.3	Puisard et pompe	58
2.7.2.2.4	Caillebotis et échelles.....	58
2.8	MODIFICATIONS DES CONDUITES DE RESTITUTION ET DE VIDANGE.....	59
2.8.1	Conduite de restitution	59
2.8.1.1	Travaux de dépose des équipements	59
2.8.1.2	Descriptif des travaux hydromécaniques.....	60
2.8.2	Conduite de vidange	62
2.8.2.1	Travaux de dépose des équipements	62
2.8.2.2	Descriptif des travaux hydromécaniques.....	63
2.9	DISPOSITIFS DE CONTROLE COMMANDE	64
2.9.1	Bilan de puissance	64
2.9.2	Alimentation électrique du coffret	64
2.9.3	Composition du coffret.....	65
2.9.4	Radiocommande industrielle.....	66
2.9.5	Dispositifs déportés.....	67
3	PRESCRIPTIONS PARTICULIERES APPLICABLES AUX TRAVAUX.....	68
3.1	ACCES POUR TRAVAUX ET INSTALLATIONS DE CHANTIER	68
3.2	GESTION DES VENUES D'EAU	72
3.2.1	Abaissement partiel du plan d'eau	72
3.2.2	Dispositif de régulation du plan d'eau et de gestion du débit réservé.....	76

3.2.2.1	Définition du dispositif.....	76
3.2.2.1.1	Analyse des débits courants.....	76
3.2.2.1.2	Phasage des travaux et utilisation des conduites de restitution et de vidange	76
3.2.2.1.3	Mise en place d'un siphon.....	77
3.2.2.1.4	Conclusions	80
3.2.2.2	Analyse des risques de défaillance et des solutions préventives envisagées	80
3.2.3	Mise en place d'un merlon faisant office de batardeau.....	81
3.2.4	Cas de la survenance d'une crue.....	82
3.3	BESOIN EN EAU ET ELECTRICITE.....	82
3.4	SUJETIONS DE CHANTIER.....	82
3.4.1.1	Accès au bassin de dissipation.....	82
3.4.1.2	Opérations de grutage.....	83
3.5	PRISE EN COMPTE DES MESURES ERC	84
4	QUALITE DES MATERIAUX, COMPOSANTS ET EQUIPEMENTS	85
4.1	BETON ARME	85
4.1.1	Coffrage.....	85
4.1.2	Béton	85
4.1.3	Armatures du béton.....	85
4.2	CONDUITES DE VIDANGE ET DE RESTITUTION	86
4.2.1	Vanne annulaire.....	86
4.2.2	Tuyauterie	86
4.2.3	Supportage.....	87
4.3	DISPOSITIF DE MESURE DES DEBITS RESTITUES	87
4.3.1	Débitmètre électromagnétique	87
5	PLANNING.....	89
6	ESTIMATION FINANCIERE	91
ANNEXES.....		95
Annexe 1.	Plans de l'ouvrage existant.....	96
Annexe 2.	Note de calculs du génie civil du local technique	97
Annexe 3.	Plans des ouvrages et confortements projeté	98

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation du barrage des Cambous	11
Figure 2 : Vue en plan du barrage (cf. Annexe 1).....	12
Figure 3 : Vue en coupe du barrage (cf. Annexe 1).....	12
Figure 4: Localisation de l'implantation des drains (cf. Annexe 1).....	15
Figure 5: Position du pendule inversé au niveau de la chambre des vannes	16
Figure 6: Réseau de surveillance topographique (cf. Annexe 1)	17
Figures 7: Carapace existante en aval rive gauche de l'ouvrage	25
Figure 8 : Rive gauche des Cambous sur l'abaque d'Annandale, modifié avec les données de EDF TEGG (2015).....	27
Figure 9 : Rive gauche des Cambous sur l'abaque de Pells (Méthode eGSI).....	28
Figure 10 : Rive gauche des Cambous sur l'abaque de Pells (Méthode RMEI _B)	29
Figure 11: Confortement du massif de butée rive droite envisagé – en coupe (cf. Annexe 3).....	31
Figure 12: Confortement du massif de butée rive droite envisagé – en vue en plan et en 3D (cf. Annexe 3)	31
Figures 13: Photos de l'ETC de 2012 des désordres sur la cheminée aval vus de l'extérieur et de l'intérieur	34
Figure 14: Photos récentes des désordres sur le massif rive gauche	35
Figure 15 : Implantation des dispositifs d'auscultation (vue en plan).....	35
Figure 16 : Implantation des dispositifs d'auscultation (profils en long)	36
Figure 17 : Principe du pendule inversé	37
Figure 18 : Table de mesure.....	37
Figure 19: Machine de forage carotteuse électrique Hilti 350.....	38
Figure 20: Vinchons existant et position des nouveaux vinchons au droit des joints A et I en galerie du barrage	39
Figure 21: Implantation des nouveaux vinchons en galerie du barrage.....	39
Figure 22 : Configuration théorique d'un piézomètre.....	40
Figure 23 : Visualisation de l'implantation du piézomètre sur la culée rive droite (cote de forage : 228.00 m NGF)	41
Figure 24 : Visualisation de l'implantation du piézomètre sur la culée rive gauche (cote de forage : 227.00 m NGF)	41
Figure 25 : Parties d'une cellule de pression interstitielle à corde vibrante	42
Figure 26 : Cellules de pressions interstitielles.....	42
Figure 27 : Schéma d'implantation des cellules.....	43
Figure 28 : Plans définissant le coin rocheux le plus critique	44
Figure 29 : Résurgences constatées sur le massif de butée RD	45
Figure 30 : Implantation envisageable pour les drains longs plus en aval.....	46
Figure 31 : Impact estimé des crues majeures et implantation envisageable pour les drains longs.....	47
Figure 32 : Représentation schématique avant/après des drains.....	47
Figure 33 : Graphique des mesures des drains en débit 2003-2021	48
Figure 34 : Graphique des mesures des drains en piézométrie 2003-2021	48
Figure 35 : Coupe sur drain complémentaire en rive droite	49
Figures 36 : Photos des drains existants en rive gauche (dont les têtes sont à modifier)	49
Figure 37 : Profil en long du collecteur en rive gauche (cf. Annexe 3).....	51
Figure 38 : Profil en long du collecteur en rive droite (cf. Annexe 3)	51
Figure 39 : Plan exemple bac avec déversoir triangulaire à paroi mince (Source : ABT)	52
Figure 40 : Photo de l'ouvrage de comptage avec échancrure de 1/8 (mesure allant de 0 à 14 m ³ /h) (Source : ABT).....	52
Figures 41 : Implantation des déversoirs dans la chambre aval (cf. Annexe 3).....	53
Figure 42 : Vue 3D des éléments du local à déconstruire	54
Figure 43 : Moyens de démolition soignée (scie murale et scie à câble diamanté)	55
Figure 44 : Vue du local projeté.....	56
Figure 45 : Treuil monorail.....	56

Figure 46 : Détail des ouvertures de la dalle de couverture	57
Figure 47 : Détail de l'étanchéité contre le parement du barrage	57
Figure 48 : Détail du puisard.....	58
Figure 49 - Éléments à déposer sur la conduite de restitution.....	60
Figure 50 – Nouveaux équipements à installer sur le circuit de restitution	62
Figure 51 - Éléments à déposer sur la conduite de vidange.....	63
Figure 52 - Équipements à installer sur le circuit de vidange	64
Figure 53 - Implantation du disjoncteur de protection du coffret de restitution	65
Figure 54 – Radiocommande industrielle et son récepteur	66
Figure 55 : Localisation du barrage des Cambous	68
Figure 56 : Accès au barrage via la N106, orthophoto 2021	68
Figure 57: Début de la piste d'accès.....	69
Figure 58: Piste à droite de l'embranchement (accès étroit)	69
Figure 59: Conduite AEP à fleur de la surface sur l'embranchement à droite	69
Figure 60: Piste d'accès lors des travaux de 2002/2003	70
Figure 61: Plateforme de travail des travaux de 2002/2003	70
Figure 62: Plan des accès chantier	71
Figure 63: Analyse des crues sur les périodes Avril-Septembre et Juin-Septembre (moyenne des débits).....	73
Figure 64: Analyse des crues du mois d'avril	73
Figure 65: Analyse des crues du mois de mai	74
Figure 66: Analyse des crues du mois d'août.....	74
Figure 67: Analyse des crues du mois de septembre.....	75
Figure 68: Solution de prolongement de la conduite de vidange pour gestion du débit réservé.....	77
Figure 69: Siphon lors des travaux de 2002/2003	78
Figure 70: Illustration du principe de fonctionnement d'un siphon (source : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)).....	78
Figure 71: Vidange du bassin de dissipation et batardage de celui-ci.....	81
Figure 72: Surverse du barrage lors des travaux de 2002/2003.....	82
Figure 73: Rampe d'accès au bassin lors des travaux de 2002/2003	83
Figure 74: Plateforme de travail lors des travaux de 2002/2003	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Fréquences de mesure selon leurs types.....	18
Tableau 2 : Liste des études de référence pour l'élaboration du présent rapport.....	19
Tableau 3 : Calcul de la puissance surfacique corrigée pour la rive gauche	26
Tableau 4 : Comparaison des puissances surfaciques corrigées des rives gauche et droite	26
Tableau 5 : Temps de remplissage de la retenue en cas de crue (analyse par mois).....	75
Tableau 6 : Volume des crues saisonnières (juin-juillet) au droit du barrage des Cambous (en m ³).....	75
Tableau 7 : Tableau des débits moyens mensuels (1987 à 2011) apportés par le barrage de Sainte Cécile d'Andorge à la retenue des Cambous (Source : Étude BRLi - Stratégie de gestion de la ressource en eau face au changement climatique : Schéma Départemental du Gard "Eau et Climat 3.0)	76
Tableau 8 : Volume des crues saisonnières (juin-juillet) stocké au droit du barrage des Cambous avec fonctionnement du siphon (en m ³)	79

PREAMBULE

Le Conseil Départemental du Gard a à sa charge l'entretien, l'exploitation et la surveillance de nombreux barrages dans le département du Gard dont celui de Sainte Cécile d'Andorge. Construit en 1957, cet ouvrage de classe A a pour fonction l'écrêtement des crues et le soutien estival des débits d'étiage. Il se situe dans le lit du Gardon d'Alès, juste en amont du barrage des Cambous.

Les événements hydro-climatiques cévenols survenus ces vingt dernières années, associés à l'évolution de l'état de l'art en matière d'hydrologie, ont révélé les insuffisances de capacité de l'évacuateur de crue du barrage de Sainte Cécile d'Andorge.

Un dossier de révision spéciale relatif à la sécurisation du « complexe » hydraulique constitué par les barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous a été initié et remis à l'autorité de tutelle en juillet 2016. Seule la partie relative au barrage de Sainte Cécile a fait l'objet d'une instruction par les services de l'État. Cette partie a reçu un avis favorable du CTPBOH en mars 2017.

Le Conseil Départemental du Gard souhaite poursuivre la démarche de sécurisation avec la même approche consistant à considérer les deux barrages comme un complexe hydraulique cohérent. Aussi, la poursuite du projet de sécurisation du barrage des Cambous s'inscrit également dans le cadre du marché de maîtrise d'œuvre relative au projet de sécurisation du complexe hydraulique formé par les deux ouvrages.



1 CONTEXTE GENERAL

1.1 CADRE DE L'OPERATION

L'opération a été scindée en trois postes distincts :

- POSTE 1 : SAINTE CECILE – SECURISATION DU BARRAGE AVEC RENOVATION PARTIELLE DU MASQUE AMONT
- POSTE 2 : SAINTE CECILE – RENOVATION INTEGRALE DU MASQUE AMONT
- POSTE 3 : SECURISATION DU BARRAGE DES CAMBOUS

Le présent document s'inscrit dans le déroulé des prestations contenues dans le **poste 3 relatif à la sécurisation du barrage des Cambous**.

La mission de maîtrise d'œuvre confiée à BRL Ingénierie, en cotraitance avec ISL Ingénierie et MEDIAE, consiste à produire, en particulier pour ce poste 3, les éléments suivants :

- DIAG_{CAM} : Etudes de Diagnostic ;
- AVP_{CAM} : Etudes d'Avant-Projet ;
- PRO_{CAM} : Etudes de conception au niveau Projet ;
- ACT_{CAM} : Assistance au maitre d'Ouvrage pour la passation de contrats de travaux ;
- VISA_{CAM} : Examen de conformité ;
- DET_{CAM} : Direction d'Exécution des Contrats de Travaux ;
- OPC_{CAM} : Ordonnancement, Pilotage et Coordination du chantier ;
- AOR_{CAM} : Assistance lors des Opérations de Réception et pendant la période de garantie de parfait achèvement.

Le présent document constitue le **rapport d'études de Projet (PRO_{CAM})** du marché de maîtrise d'œuvre relatif à la sécurisation du complexe formé par les barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous

1.2 OBJET DE LA MISSION

L'objet de la présente mission PRO_{CAM} est d'affiner les réflexions engagées durant la phase AVP_{CAM} précédente et permettre ainsi de :

- Préciser la solution d'ensemble choisie et les choix techniques (rappelés au §2.1) au regard de l'AVP_{CAM} approuvé par le Maitre d'Ouvrage ;
- Fixer les caractéristiques et les dimensions des aménagements aux objectifs distincts (confortement de la butée rive droite, renforcement des dispositifs d'auscultation et éventuellement renforcement de la fondation dans la zone de dissipation) en tenant compte de :
 - Rapport AVP_{CAM} ;
 - La nécessaire compatibilité entre ces derniers ;
- Établir les études de Projet complètes des solutions retenues par le Maitre d'Ouvrage à l'issue de l'analyse multicritères.

1.3 PRESENTATION DU BARRAGE DES CAMBOUS

1.3.1 Localisation du barrage

Le barrage des Cambous est situé sur le Gardon d'Alès, dans le département du Gard. Le site des Cambous est situé quelques kilomètres en amont de la Grand-Combe et en aval du barrage de Sainte Cécile d'Andorge :

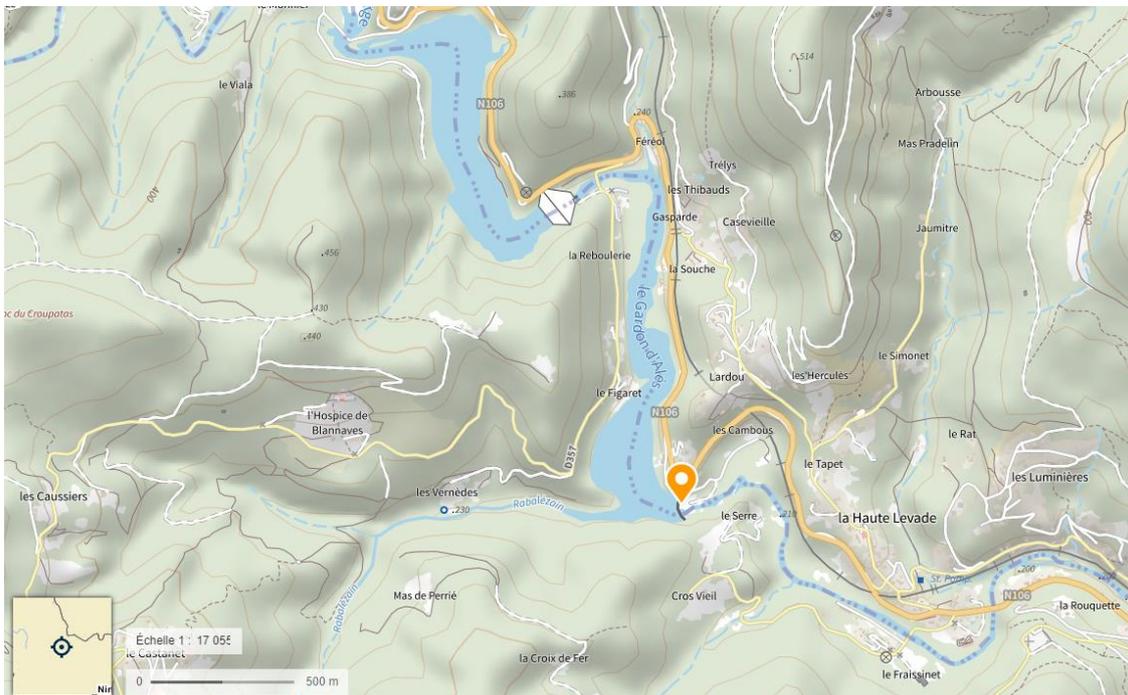
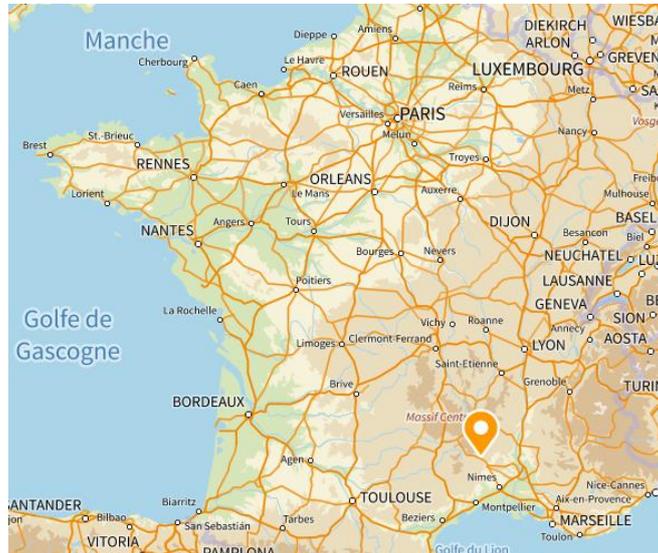


Figure 1: Localisation du barrage des Cambous



1.3.2 Géométrie de l'ouvrage

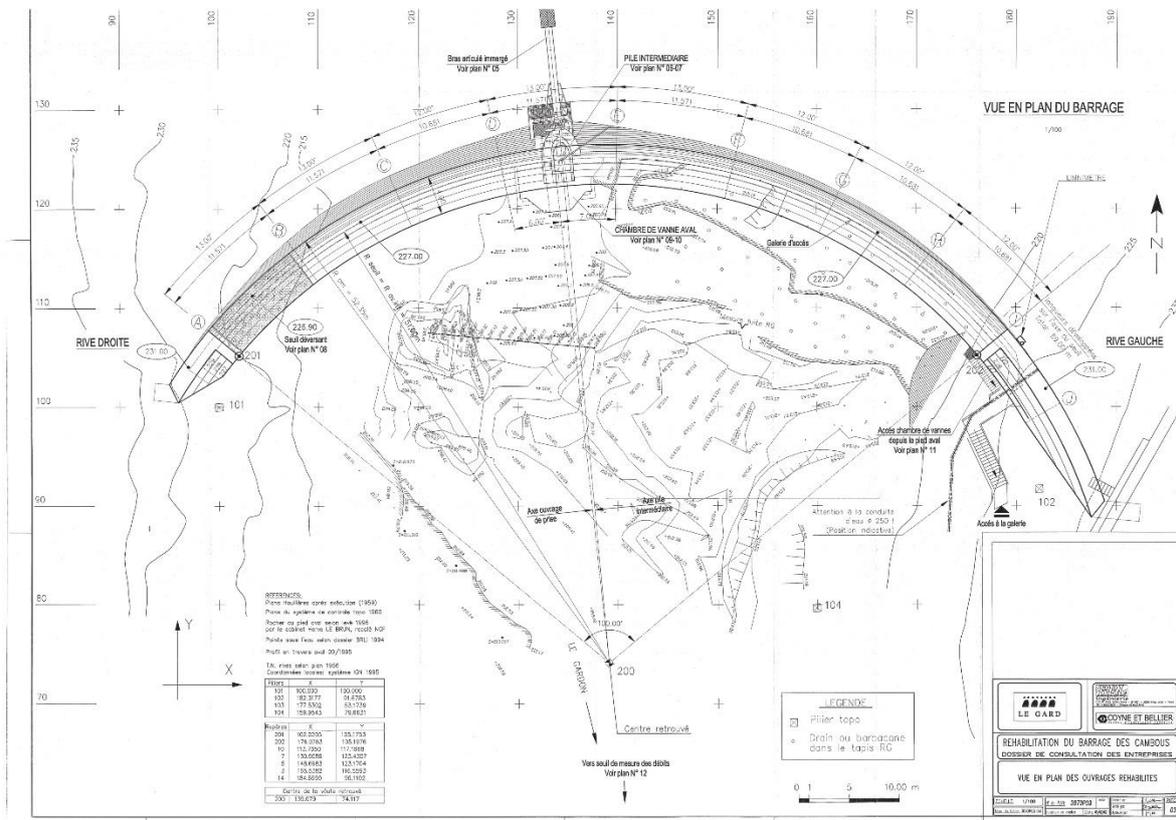


Figure 2 : Vue en plan du barrage (cf. Annexe 1)

Prise d'eau à niveau variable Bras articulé immergé

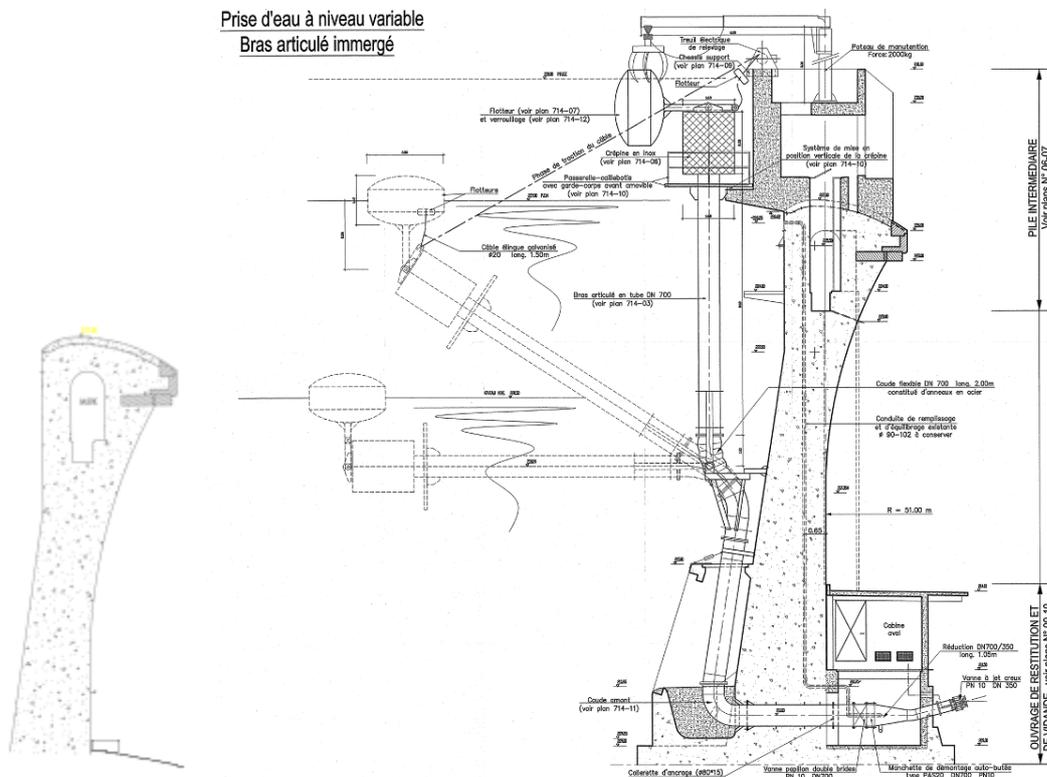


Figure 3 : Vue en coupe du barrage (cf. Annexe 1)



1.3.3 Caractéristiques du barrage

Les principales caractéristiques de l'ouvrage mis en service en 1957, sont résumées dans le texte ci-après.

SITE – HYDROLOGIE

Le barrage des Cambous est situé sur le Gardon d'Alès, dans le département du Gard.
Le site des Cambous est situé quelques kilomètres en amont de la Grand-Combe.
Le barrage avait pour but de stocker de l'eau pour le fonctionnement des activités minières. Depuis l'arrêt de ces activités, il a pour but les activités touristiques et la régulation du débit du Gardon d'Alès en période d'étiage en complément du barrage de Ste Cécile d'Andorge situé juste en amont.

Aire du bassin versant	: 124 km ²
Ancienneté des relevés des crues	: 1955
Date de la plus forte crue connue	: 1958
Débit de la plus forte crue connue	: 550 m ³ /s (selon estimation)
Crue millénale estimée	: 930 m ³ /s (dans l'état actuel du barrage de Sainte Cécile d'Andorge) 1080 m ³ /s (état réaménagé) ¹

RETENUE

Cote normale de la retenue	: 227 mNGF
Cote maximale exceptionnelle	: 231 mNGF
Capacité normale de la retenue	: 1 hm ³
Capacité maximale	: 2.5 hm ³
Aire normale de la retenue	: 19 ha

OUVRAGE DE VIDANGE

Vidange par conduite Ø 700 mm (équipée d'un jet creux Ø 600 mm)
Q maximal : 4 m³/s sous RN

ÉVACUATEURS

Évacuateur de surface par seuil déversant

Cote du seuil	: 227 mNGF
Longueur du seuil	: 89 m

¹ Débits de crue millénale estimés issus de l'étude de stabilité du barrage des Cambous, 2021, ISL Ingénierie (réf. [1])

**OUVRAGE DE PRISE**

Prise à niveau variable Ø 700 mm (équipée d'un jet creux Ø 350 mm)

Q maximal : 1,4 m³/s sous RN

OUVRAGE

Type : Barrage voûte déversante à simple courbure (béton) de classe A

Altitude en crête : 227 mNGF

Hauteur maximale au-dessus du TN : 19 m

Longueur en crête : 120 m

Largeur en crête : 4 m

Largeur minimale : 2 m

Largeur maximale au niveau du TN : 10,3 m

FONDATIIONS

Nature : Rocher constitué de micaschistes sains

Cote : 211 mNGF

Coupure étanche : Injection pour créer un voile d'étanchéité

Drainage : Fondation aval non drainée lors de la construction en 1957.

Création d'une cinquantaine de puits de décompression de 7 à 10 m de profondeur + tapis en BA et barbacanes en 1960 après la rupture du barrage de Malpasset.

Puis création de 20 nouveaux drains en 2003. Une quarantaine de forages (dont les 20 nouveaux) ont été équipés de tubes coudés en partie supérieure.

1.3.4 Chronologie des principaux travaux effectués sur le barrage

La chronologie des principaux travaux réalisés sur le barrage est donnée ci-dessous :

- 1955 : construction du barrage ;
- 1960 : travaux sur le pied aval Rive Gauche du barrage (tapis béton de 30-40 cm d'épaisseur au droit de la zone déversante, barbacanes à travers ce tapis, drains verticaux de 7 à 10 m de profondeur dans le rocher en pied aval) ;
- 1969 : relevé d'une fissure en pied aval en rive droite ;
- 1978 : mise en œuvre de béton en pied aval rive droite suite à quelques érosions ;
- 1982-1983 : décolmatage des drains suite aux remarques du PV de la visite décennale de 1979-1980 ;
- 1995 : modernisation du dispositif d'auscultation topographique et installation de deux vinchons ;



- 2002-2003 : réfection du seuil du déversoir avec création d'une échancrure en rive droite (environ 10 cm de profondeur et 10 m de largeur) dont la vocation est l'évacuation des corps flottants de taille modeste en exploitation normale. Création d'une pile centrale pour mettre en place le flotteur du pendule et les organes de manutention de la prise à niveau variable (cette pile permet en outre le fractionnement de la lame déversante et donc une meilleure aération en sous-face). Installation d'un pendule. Réhabilitation du système de drainage en pied aval du barrage. Rénovation complète du dispositif de vannage avec l'installation d'une prise à niveau variable ;
- 2006 : traitement des épaufrures de la culée rive droite par exécution d'un cheminement aval sur le massif de butée rive droite ;
- 2010 : travaux sur les systèmes de commande des vannes à jets creux et sur les dispositifs de protection des embâcles (capot de protection plein évitant que des embâcles ne se coincent dessous et gênent la manœuvre), avec installation d'une passerelle facilitant l'accès pour la maintenance.

1.3.5 Dispositifs d'auscultation actuels du barrage

1.3.5.1 Dispositif de drainage

Depuis 2003, le barrage des Cambous est équipé de 20 drains, dont le comportement est mesuré soit à la sonde (en partie centrale du barrage notamment), soit en débit (au niveau des rives notamment).

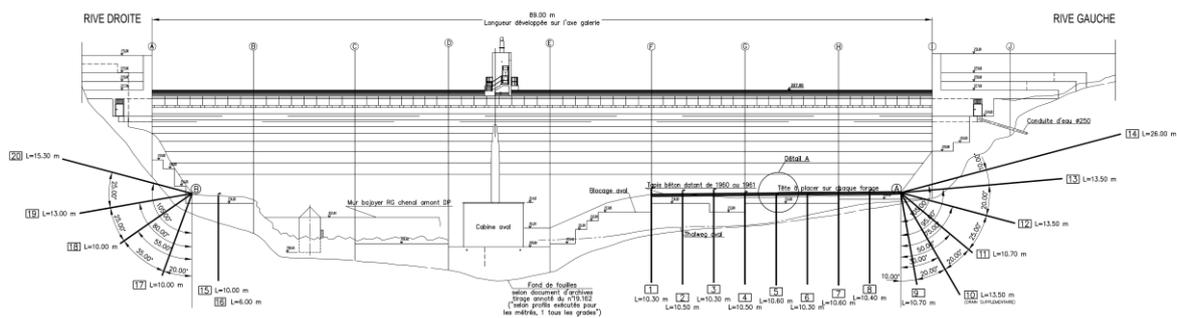


Figure 4: Localisation de l'implantation des drains (cf. Annexe 1)

Les débits analysés sont :

- En rive droite, par cumul des drains :
 - En culée RD (17 à 20) ;
 - Entre les joints A et B (15 et 16) ;
- En rive gauche, par cumul des drains :
 - En culée RG (11 à 14) ;
 - Entre les joints H et I (9 et 10) ;
 - Entre les joints G et H (5 à 8) ;
 - Entre les joints F et G (2 à 4) ;
 - Entre les joints E et F (1).



1.3.5.2 Piézomètres

Le barrage des Cambous n'est pas équipé de véritables piézomètres. Des mesures en piézométrie sont effectuées sur les drains ne débitant pas au moyen d'une sonde (cf. §1.3.5.1). Ces derniers sont essentiellement situés en partie centrale de l'ouvrage.

1.3.5.3 Suivi géomécanique

Le barrage est équipé de 2 systèmes de mesure d'écartement de joints de type Vinchon (mesure X, Y, Z) au niveau des joints A, entre le barrage et la culée RD, et au niveau du joint I, entre le barrage et la culée RG.

Depuis 2003, un pendule inversé a également été installé. Cet instrument est positionné au niveau de la pile centrale, dans le puit en clé de voûte aval :

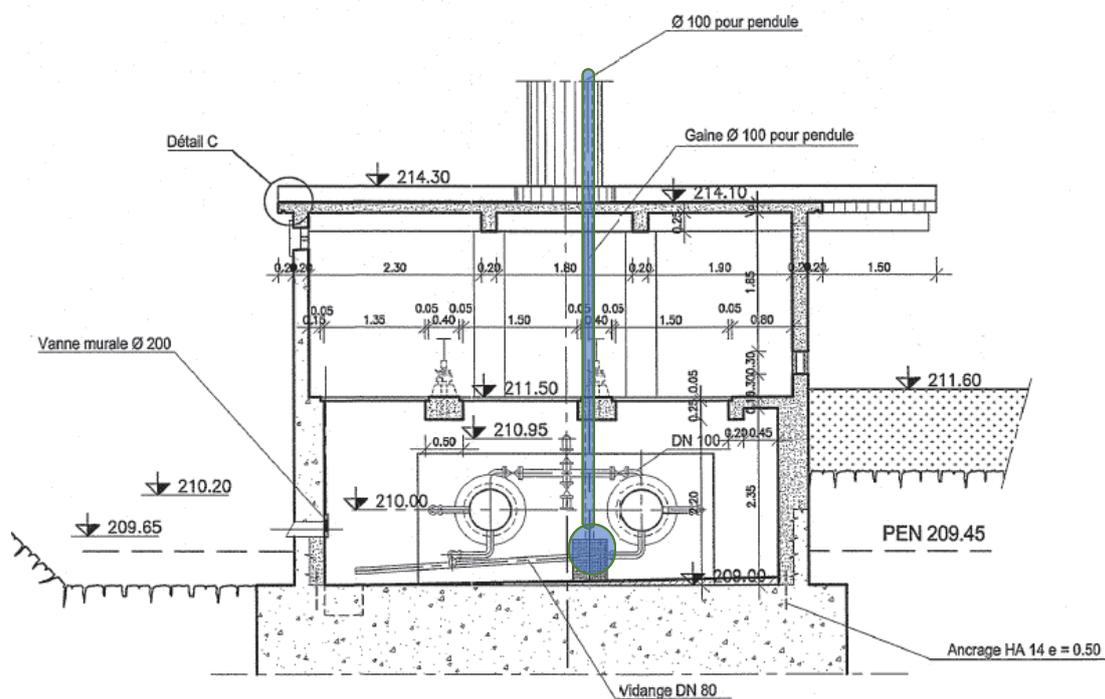


Figure 5: Position du pendule inversé au niveau de la chambre des vannes



1.3.5.4 Suivi topométrique

Le réseau de surveillance topographique est le suivant :

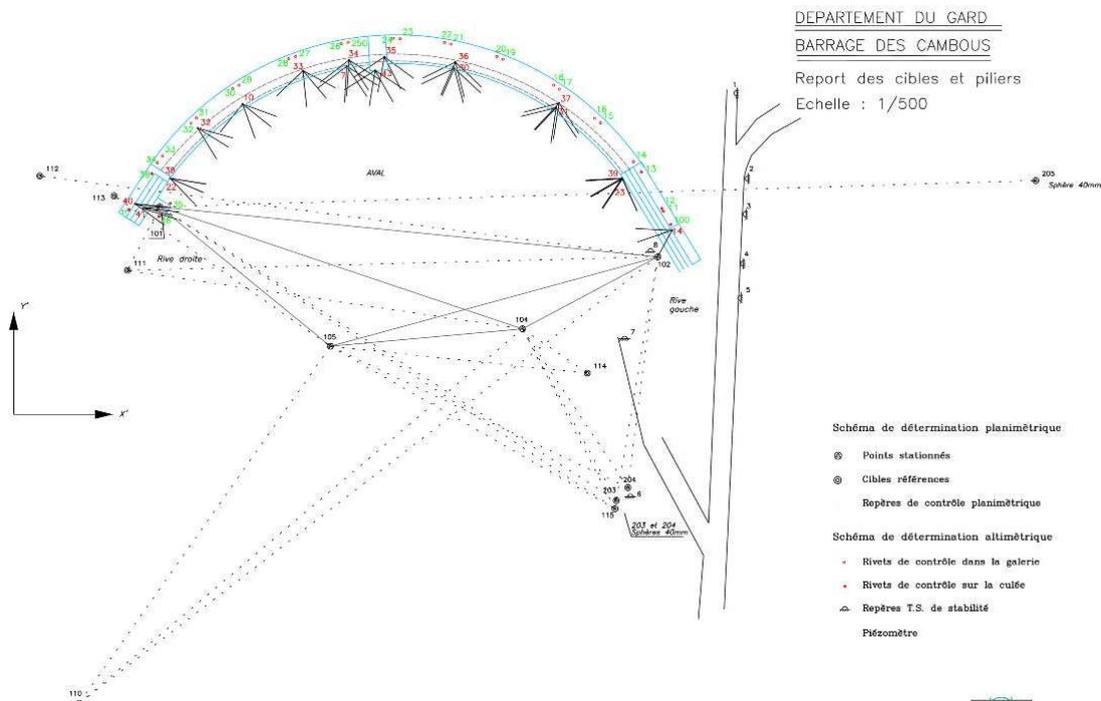


Figure 6: Réseau de surveillance topographique (cf. Annexe 1)

La surveillance en planimétrie se fait à l'aide de 17 cibles placées sur la face aval de l'ouvrage et réparties sensiblement sur deux niveaux.

La surveillance en altimétrie se fait à l'aide de 8 cibles situées en rive gauche, de 4 rivets sur la culée rive gauche, de 2 rivets sur la culée rive droite et de 21 rivets implantés sur le côté aval de la galerie (+ deux en sortie rive droite).

1.3.5.5 Suivi du plan d'eau et de la température

Le plan d'eau est mesuré au moyen de :

- Un limnimètre à flotteur, implanté au droit de la culée rive gauche ;
- Une sonde piézométrique, implantée au droit de la culée rive gauche ;
- Une échelle limnimétrique, implantée au droit de la culée rive gauche.

La température de l'air est mesurée à proximité du barrage de Sainte Cécile, au droit de la maison du barragiste.

Il n'y a pas de suivi de la température de l'eau.



1.3.5.6 Fréquences de mesure

Les fréquences de mesures sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Fréquences de mesure selon leurs types

	Type de mesures	Fréquence
Topométrie	Planimétrie	Annuelle
	Nivellement	Annuelle
Mesures mécaniques	Pendule	Mensuelle + en crue
	Vinchons	Mensuelle + en crue
Mesures hydrauliques	Drains (avec mesure en piézométrie)	Mensuelle (à minima trimestrielle avec l'abaissement du plan d'eau)
Mesures PE	Limnimètre	Journalière
Mesure T°C	Thermomètre	Journalière

1.3.6 Descriptif de la distribution électrique

1.3.6.1 Alimentation électrique

Le barrage est alimenté par une ligne aérienne basse tension 400 V.

À l'aval du disjoncteur d'arrivée, la distribution électrique se poursuit à l'intérieur de la galerie du barrage pour aboutir dans un coffret de distribution.

1.3.6.2 Distribution électrique

Ce coffret est protégé en tête par un disjoncteur triphasé + neutre de calibre 32 A associé à un différentiel de 300 mA.

À l'aval de ce disjoncteur, on retrouve les départs suivants :

- Circuit d'éclairage protégé par un disjoncteur 10 A ;
- Circuit prises de courant protégé par un disjoncteur 16 A ;
- Potence protégée par un disjoncteur triphasé + neutre 16 A ;
- Treuil protégé par un disjoncteur triphasé + neutre 16 A
- Pompe vide cave protégée par un disjoncteur 6 A.

1.3.6.3 Contrôle commande

Actuellement, le barrage ne dispose d'aucun moyen de contrôle commande des équipements. Les manœuvres des vannes sont effectuées manuellement et la vérification de leur position est réalisée visuellement.

Seule la pompe d'exhaure du local de restitution peut être commandée manuellement ou automatiquement via deux poires de niveaux « haut » et « très haut ».



1.4 DOCUMENTS DE REFERENCE

Tableau 2 : Liste des études de référence pour l'élaboration du présent rapport

N°	Date	Titre	Auteur
[1].	2021	A00593_CAM_DIA_IndC – Sécurisation du complexe hydraulique formé par les barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous – Diagnostic du barrage des Cambous (juin 2021)	ISL Ingénierie
[2].	2021	Rapport XX3-P21704 – Auscultation de deux échantillons de béton provenant d'une culée du barrage des Cambous (mars 2021)	Université Gustave Eiffel
[3].	2021	Conseil Départemental 30 – Barrage des Cambous – Ste Cécile d'Andorge (30) – Présentation des investigations réalisées – Dossier CDGP.K.2004 (janvier 2021)	GINGER CEBTP
[4].	2020	Relevés topographiques	B-bass Géomètre expert
[5].	2018	Recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages - voûtes	CFBR
[6].	2016	Mission de maîtrise d'œuvre pour le confortement du massif de la butée rive droite et la réfection ponctuelle du parement aval - Diagnostic	Lombardi
[7].	2016	Mission de maîtrise d'œuvre pour le confortement du massif de la butée rive droite et la réfection ponctuelle du parement aval - AVP	Lombardi
[8].	2016	Avis de l'IRSTEA du 11 avril 2016 relatif au rapport d'analyse du dispositif d'auscultation du barrage des Cambous vis-à-vis de la spécificité d'une voûte en vallée large	IRSTEA
[9].	2015	Analyse du dispositif d'auscultation vis-à-vis de la spécificité d'une voûte en vallée large - Etude Préliminaire	BRL Ingénierie
[10].	2016	Erosion of rock in spillways. School of Civil and Environmental Engineering. Thèse	Pells, S. School of Civil and Environmental Engineering - Faculty of Engineering - University of New South Wales
[11].	1995	Erodibility, JHR	Annandale, G.W.



[12].	2019	Etude du potentiel d'érosion du chenal en aval des vannes de fond du barrage de Petit-Saut par application des critères eGSI et RMEI	Anaïs FAIVRE, Benoit BLANCHER, Florence LAFON, EDF- CIH, Colloque CFBR : « Justification des barrages : Etat de l'art et Perspectives »
[13].	2021	Note technique – Avis technique sur le choix de la mesure de débit de restitution – Barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous	EDF
[14].	2002- 2003	Dossier de photos du chantier de rénovation du seuil	CD30
[15].	2021	A00593_CAM_AVP_IndD – Sécurisation du complexe hydraulique formé par les barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous – AVP du barrage des Cambous (août 2021)	BRL Ingénierie
[16].	2022	Sécurisation du complexe hydraulique formé par les barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous – Pièce 3b – Dossier d'autorisation environnementale – Etude d'impact, valant document d'incidence au titre de la Loi sur l'Eau – Volume 2/3 : Impacts et mesures associés	BRL Ingénierie
[17].	2022	Barrage des Cambous – Présentation des investigations réalisées en aval rive gauche – Dossier CDGP.M.2002 (Octobre 2022)	GINGER CEBTP
[18].	2023	Sécurisation du complexe hydraulique formé par les barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous – Gestion des plans d'eau durant les travaux (ind B)	ISL Ingénierie



2 DESCRIPTION DES TRAVAUX ENVISAGES

2.1 RAPPEL DES RELEVÉS DE DÉCISIONS ISSUS DE L'AVP

Les solutions techniques retenues en phase AVP sont les suivantes :

2.1.1 Travaux de confortement

MASSIF DE BUTÉE RIVE DROITE

- Injection des vides/fissures ;
- Mise en place de drains ou barbacanes descendants ; correctement orientées vis-à-vis de l'écoulement pour éviter l'introduction de pressions hydrodynamiques (et avec un col de cygne) ;
- Mise en œuvre de treillis d'armatures et de béton projeté pour la réalisation d'une carapace.

FOSSE AVAL RIVE DROITE

L'analyse du risque d'érosion au pied du barrage a été menée lors de la phase AVP précédente. Il en ressort la nécessité de mettre en œuvre une protection de la fosse aval rive droite afin de limiter les risques d'affouillement. Ce confortement prévoit :

- La purge/déroctage superficiel ;
- La mise en œuvre d'une dalle en béton armé d'épaisseur minimale de 50 cm (revue à 60 cm minimum en PRO), ancrée dans le substratum rocheux par des barres de diamètre 32 mm, de longueur scellée de 4 m, d'espacement d'un mètre en quinconce (soit 1 ancrage par mètre carré).

2.1.2 Amélioration des dispositifs d'auscultation

POUR LE SUIVI DE LA DÉFORMATION DU BARRAGE

- Mise en place d'un deuxième pendule inversé en pied de barrage ;
- Mise en place de 6 nouveaux vinchons en galerie du barrage.

POUR LE SUIVI DES PRESSIONS INTERSTITIELLES

- Mise en place de 2 piézomètres (un au droit de chaque culée) ;
- Mise en place de 3 cellules de pression interstitielle ;
- Mise en place de 4 drains complémentaires en aval rive droite ;
- Mise en place de drains supplémentaires de grande longueur dans le massif de butée rive droite ;
- Mise en place de deux collecteurs permettant de canaliser les débits de drainage jusqu'à la cabine aval ;
- Adaptation des têtes de drains existants.



2.1.3 Augmentation de la capacité de vidange

- Suppression du réducteur DN700/350 sur la conduite de restitution ;
- Remplacement des vannes à jet creux par des vannes annulaires à piston ;
- Ajout d'un débitmètre sur la conduite de restitution ;
- Piquage des by-pass à reprendre.

2.1.4 Vérification de la stabilité de l'ouvrage

L'étude de la stabilité de l'ouvrage a déjà été menée au §3 du diagnostic [1].

Les conclusions de l'étude de stabilité de l'ouvrage sont rappelées ci-dessous afin d'assurer la complétude du document :

- Une rehausse des culées n'est pas nécessaire ;
- La stabilité des coins rocheux des appuis est assurée ;
- Le glissement de la culée en rive droite n'est pas envisagé compte tenu de son blocage au rocher. En rive gauche le glissement est difficilement envisageable du fait qu'il nécessiterait un cisaillement du béton de la culée ou du rocher ;
- Les calculs des plots centraux montrent que :
 - il faudrait une cohésion apparente pour démontrer la stabilité et que cette cohésion apparente est du même ordre de grandeur, voire supérieure à ce que l'expertise géologique évalue, sous les fondations des culées ; cependant, les calculs sont jugés conservatifs car :
 - la simplification du maillage a ignoré la butée aval du rocher et la sur-largeur nécessitée par les organes de vidange insérés dans le plot central ;
 - aucun signe d'insuffisance de résistance n'est relevé (pas de fissuration, pas de déplacement relatif aux joints inter-plots) alors même que le barrage a déjà vécu de manière certaine des hivers froids comparables à ceux simulés ;
 - une ouverture du contact béton/rocher avec une propagation potentielle de la sous-pression sous les consoles centrales conduit à envisager de compléter le système d'auscultation du barrage.

2.2 APPORTS ET MODIFICATIONS MAJEURES DE LA PHASE PRO

Les modifications suivantes ont été apportées entre le l'AVP et le PRO :

- Analyse du risque d'érosion au pied du barrage en rive gauche ;
- Ajustement de la conception du confortement de la fosse aval ;
- Précisions sur la déconstruction et reconstruction de la chambre aval ;
- Calcul du nouveau génie civil de la chambre aval ;
- Modification de la solution technique sur la conduite de restitution et de vidange ;
- Étude de la gestion du plan d'eau et du débit réservé ;
- Étude détaillée des aspects chantier.



2.3 RECONNAISSANCE DU FOND DE LA FOSSE AVAL ET ÉTUDE GEOTECHNIQUE G3

Une reconnaissance du fond de la fosse aval et une étude géotechnique de type G3 au sens de la norme NFP 94-500 de novembre 2013 comprenant des sondages carottés et des reconnaissances géophysiques seront réalisées afin de déterminer notamment :

- La nature du fond de la fosse et l'épaisseur des alluvions (s'il y en a) ;
- D'affiner les solutions de confortement de la fosse aval et du massif de butée ;
- L'épaisseur du tapis ;
- La profondeur du substratum au niveau de la fosse aval ;
- L'indice d'érodabilité du rocher sain ;
- La solution de batardage aval.

Les sondages et reconnaissances à réaliser sont à minima les suivants (sans que cette liste soit exhaustive) :

- Sondages carottés et pressiométriques ;
- Essais Lugeon ;
- Reconnaissance de type géophysiques ;
- Etc,...

2.4 ANALYSE COMPLÉMENTAIRE DU RISQUE D'ÉROSION EN AVAL RIVE GAUCHE DU BARRAGE

2.4.1 Analyse du risque d'érosion au pied du barrage en rive gauche

2.4.1.1 Calcul de la puissance surfacique corrigée

La présente analyse vise à estimer le risque d'érosion à l'aval du seuil déversant de la voute des Cambous.

Une approche visant à apprécier l'érodabilité du rocher a été réalisée dans le cadre de l'AVP pour la rive droite du barrage, là :

- Où une fosse est observable ;
- Où les marges de sécurité en matière de stabilité des plots sont les moins importantes.

À la demande de l'AMO EDF CIH, une analyse a également été menée pour la rive gauche qui se différencie de la rive droite par :

- Son altimétrie avec des cotes du terrain naturel situées environ 5 à 6 m au-dessus du fond de la fosse aval ;
- Un revêtement par une carapace en béton mise en œuvre en 1960. En première approche, ce revêtement n'a pas été pris en compte dans l'analyse. Pour disposer de davantage d'information, 4 sondages courts ont été réalisés en août 2022 afin d'identifier le contact entre le béton et le rocher (Réf. [17])



Les photographies ci-dessous présentent la carapace.





Figures 7: Carapace existante en aval rive gauche de l'ouvrage

Les calculs de puissance surfacique corrigés ont été menés conformément à la méthode présentée dans l'AVP en modifiant seulement la cote du terrain naturel au pied du barrage. Cette modification impacte un certain nombre de paramètres du calcul théorique.

De manière moins théorique, par rapport à la rive droite, le terrain naturel de rive gauche est plus haut (cote d'environ 214,5 m NGF) et le niveau d'eau aval est inchangé. Il en résulte une lame d'eau réduite. Le matelas d'eau au pied aval est donc moins important ce qui conduit à une augmentation de la puissance surfacique corrigée au niveau du rocher.



Le tableau suivant présente les paramètres du calcul spécifique à la rive gauche pour les débits de pointe des deux crues historiques et celui de la crue estimée de période de retour 1000 ans.

Tableau 3 : Calcul de la puissance surfacique corrigée pour la rive gauche

			Q1000	Q1958	Q1977
Q	Débit	m ³ /s	1080	550	240
Aj	Surface d'impact	m ²	75	46	29
Pjet	Puissance théorique du jet	kW	150 120	79 750	32 880
Pjet surfacique	Puissance surfacique théorique du jet	kW/m ²	1998	1717	1148
Zf	cote du fond	m NGF	214,5	214,5	214,5
Y	Profondeur de lame d'eau de réception	m	2,0	0,2	0,0
Y/Bj	Ratio	sans dim	2	0	0
Lj/Lb_nappe	Longueur de casse du jet	sans dim	1,2	1,7	2,5
Cp	Abaque coefficient de pression dynamique moyenne	sans dim	0,40	0,08	0,08
Cp'	Abaque coefficient de pression de fluctuation dynamique	sans dim	0,24	0,17	0,12
F	facteur d'effet du bris sur les fluctuation dynamimique	sans dim	1,0	1,0	1,0
Ptotal	Puissance surfacique corrigée du jet	kW	1279	429	230

À noter, les lames d'eau de réception en pied sont faibles (entre 0 et 2 m). Pour la crue de 1977, le niveau aval (environ 113 m NGF) est inférieur au niveau du terrain au pied du barrage. Le jet frappe donc directement le terrain.

Le tableau suivant compare les puissances surfaciques corrigées du jet en rive gauche et en rive droite.

Tableau 4 : Comparaison des puissances surfaciques corrigées des rives gauche et droite

		Q1000	Q1958	Q1977
Débit	m ³ /s	1080	550	240
Puissance surfacique corrigée du jet en RIVE GAUCHE	kW	1279	429	230
Puissance surfacique corrigée du jet en RIVE DROITE	kW	1299	275	149



2.4.1.2 Analyse de l'érodabilité aval

Les graphiques suivants présentent le positionnement des conditions de fonctionnement sur les différents abaques (Annandale, eGSI, RMEIb) permettant d'apprécier les conditions d'érodabilité

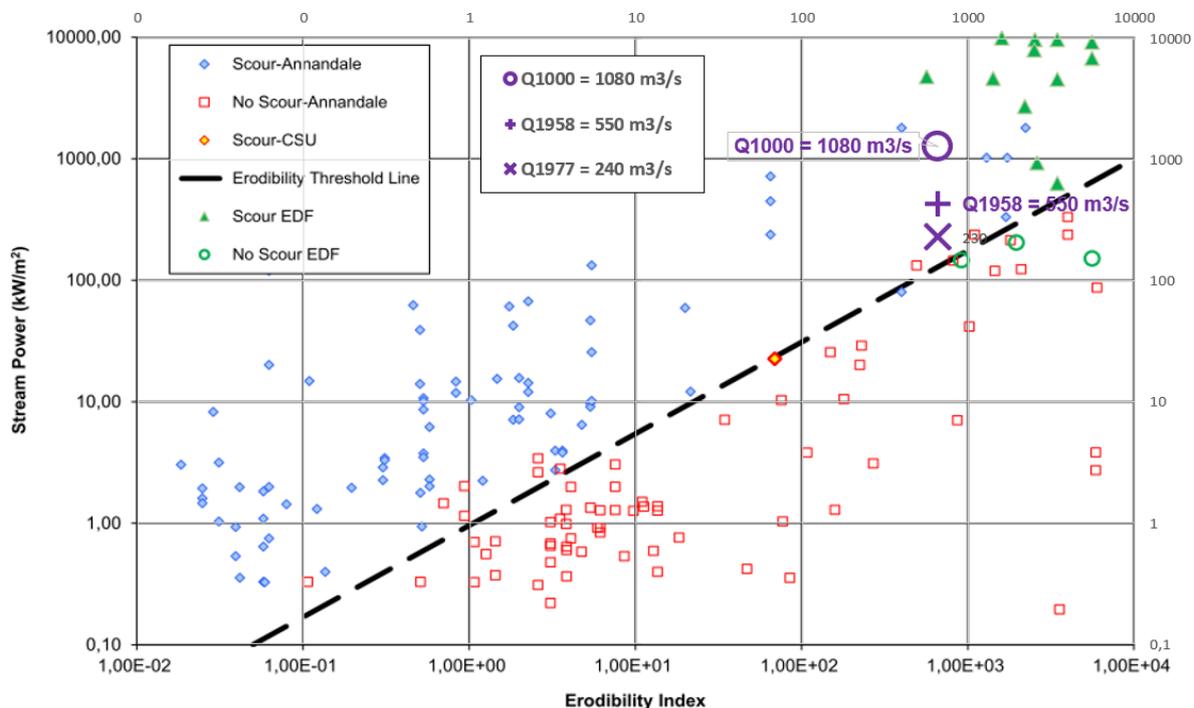


Figure 8 : Rive gauche des Cambous sur l'abaque d'Annandale, modifié avec les données de EDF TEGG (2015)

Au sens de l'approche de Annandale, le croisement {puissance surfacique à dissiper}/{indice d'érodabilité}, conduit à dépasser légèrement le seuil d'érosion lors de la crue historique de 1958 et à rester au niveau du seuil d'érodabilité pendant la crue de 1977. En revanche, le seuil d'érosion est largement franchi pour le débit estimé de période de retour 1000 ans.

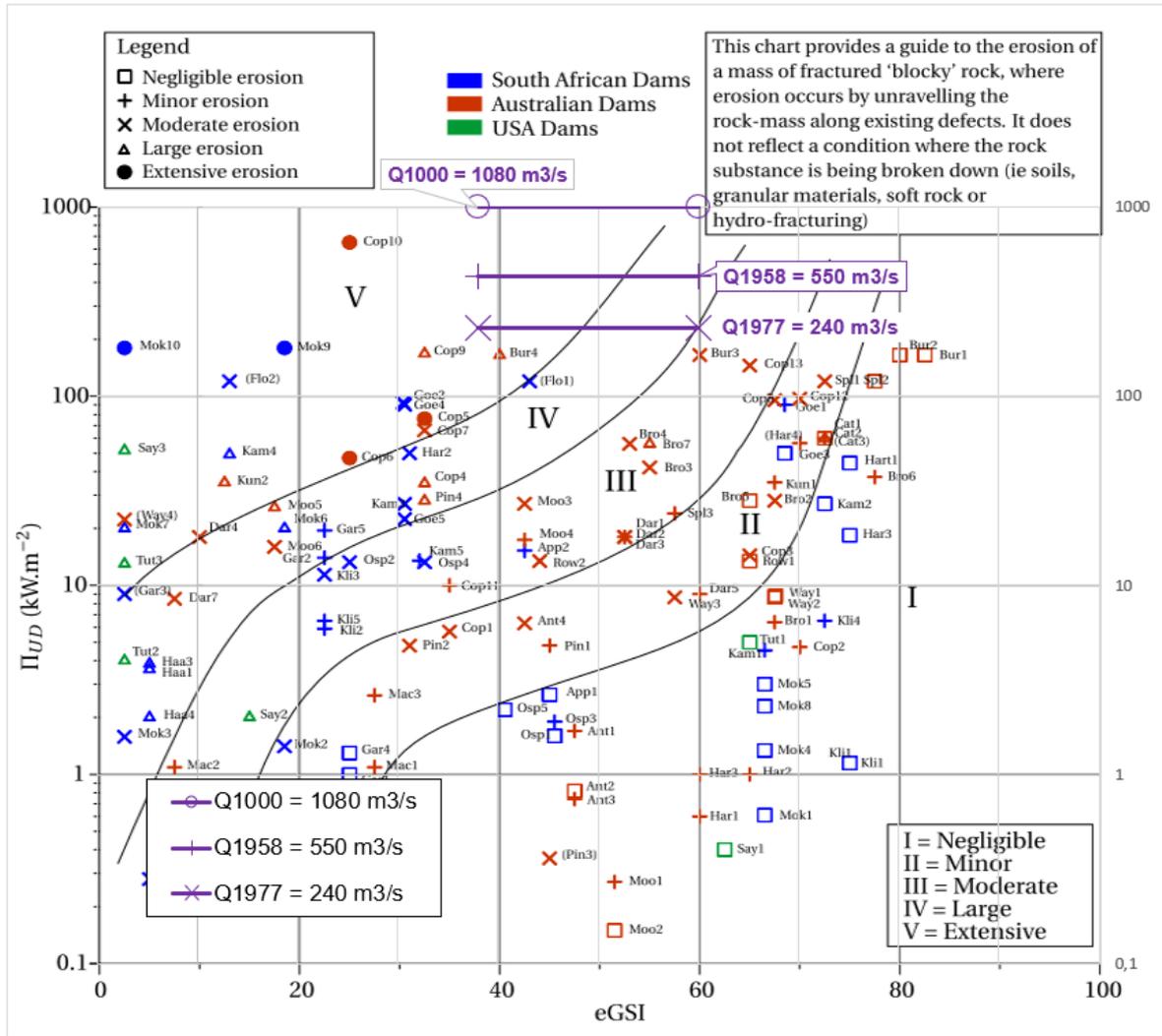


Figure 9 : Rive gauche des Cambous sur l'abaque de Pells (Méthode eGSI)

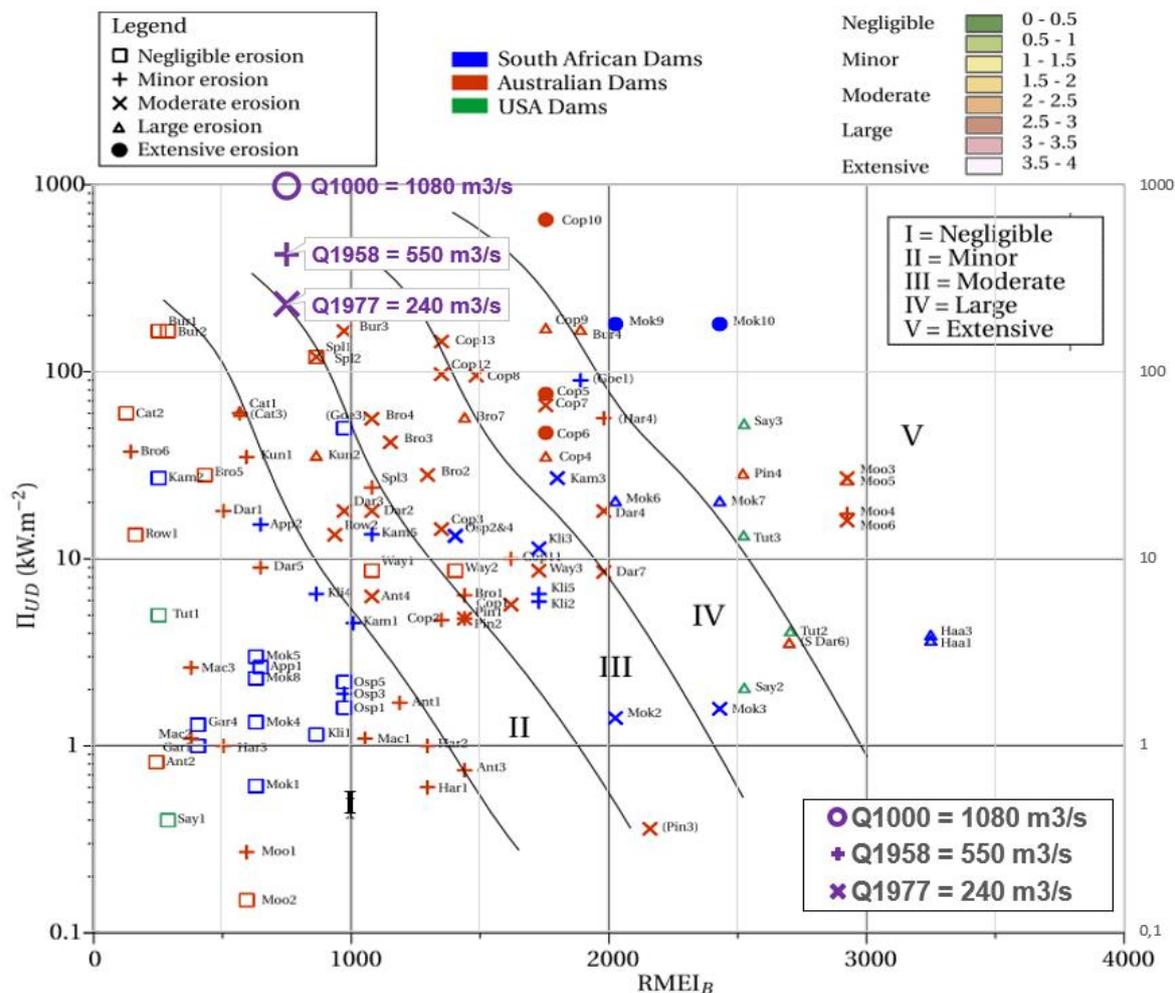


Figure 10 : Rive gauche des Cambous sur l'abaque de Pells (Méthode RMEI_B)

Les approches eGSI et RMEI_B permettent de conclure que la puissance surfacique corrigée du débit de pointe estimé de T=1000 ans conduit à franchir 1 à 2 classes d'érodabilité par comparaison aux débits des 2 crues historiques et à initier une forte érosion.

2.4.1.3 Conclusions sur l'érodabilité

L'érodabilité a été analysée pour 3 débits : crue de 1958 (550 m³/s), crue de 1977 (240 m³/s) et crue théorique de période de retour 1000 ans.

On rappelle que la carapace a été réalisée en 1960. Elle est donc postérieure à la crue de 1958 et antérieure à celle de 1977. Elle ne présente pas de dommages significatifs (arrachement de plaque, fracturation ...) lors de la seule crue significative (1977). Cela est conforme à l'abaque d'Annandale (une érosion mineure était déduite de l'approche RMEI_B et une érosion moyenne était prévue par l'approche eGSI).

Mais la puissance surfacique corrigée de la crue théorique Q1000 fait craindre une érosion forte par toutes les méthodes : elle est largement en excès de celle de la crue de 1977 (d'un facteur de l'ordre de 5).

Le comportement passé de la fondation lors des déversements ne peut donc renseigner sur son comportement pour un débit de 1080 m³/s.



2.5 TRAVAUX DE CONFORTEMENT

2.5.1 Confortement du massif de butée rive droite

Afin de conforter le massif de butée en rive droite, il est proposé :

- La réalisation de forages/injection de **consolidation** ayant pour objectif de traiter les vides présents sous la couverture béton.

Ces différentes injections seront menées par injection basse pression tout en ayant une vigilance particulière vis-à-vis des résurgences et des risques de soulèvement. L'injection sera réalisée en plusieurs étapes successives dans un ensemble de perforations courtes, qui joueront le rôle d'évents et permettront de suivre la bonne répartition du coulis.

Des essais d'eau (de type Lugeon) seront réalisés au préalable dans ces forages afin d'adapter les coulis et la pression d'injection. D'une manière générale, il est attendu un débit d'injection faible.

En parallèle, un suivi topographique de la zone injectée sera mis en place afin de détecter d'éventuels soulèvements. On limitera ces soulèvements à 1mm maximum.

La méthodologie d'injection finalement proposée et retenue par l'Entreprise fera l'objet d'une validation du Maître d'œuvre sur un plot d'essai, permettant de s'assurer à la fois de l'efficacité du mode opératoire et de l'absence de dommages sur l'ouvrage au cours de l'opération. Cet essai sera conduit sur 2 forages d'étanchéité sur la ligne amont (cf. point ci-après). Une méthode incrémentale sera employée afin d'établir les jeux de paramètres et figer les méthodes d'injection qui seront largement utilisées sur l'ensemble des autres forages ;

- La réalisation de forages/injections **d'étanchéité** de la rive droite, en commençant par la ligne amont située sous la voûte (cf. Figure 12) ;

- La réalisation de 4 forages à travers le massif consolidé faisant office de drains longs et descendants. Ces forages draineront les circulations aquifères résiduelles entre le béton et le substratum rocheux. Afin d'améliorer leur efficacité, ils seront inclinés de telle sorte à recouper le contact béton/rocher mais aussi les plans de fondation du coin rocheux (cf. §2.6.2.3). Le positionnement de ces drains descendants sera affiné au moment des travaux sur le massif de butée. Ils seront en effet installés dans les zones de résurgences constatées avant travaux, pour laisser l'eau s'écouler.

Ils présenteront un exutoire en col de cygne en acier galvanisé orienté vers l'aval (orientation favorable vis-à-vis de la lame d'eau déversante).

Ces drains longs sont au nombre de 4. Toutefois, et préalablement à leur réalisation, un constat contradictoire sera réalisé entre le maître d'œuvre et l'entreprise afin de définir précisément leur implantation et leur nombre ;

- La mise en œuvre de treillis soudés et de béton projeté d'épaisseur 30 cm (en 2 passes minimum) sur la partie basse du massif de butée existant afin de le consolider et de le protéger des agressions liées au jet d'eau provenant de la surverse du barrage. La mise en place d'un ancrage/clouage modéré (4 HA12 par m²) viendra compléter ce confortement et assurer une bonne tenue de cette nouvelle carapace.

Selon la géométrie et les résultats des injections de consolidation, la déconstruction partielle et localisée de la carapace existante reste envisageable pour obtenir une surface d'accroche plus uniforme.

- Le nettoyage et l'injection des fissures, situées sur la partie de massif au-dessus du trottoir de cheminement, à l'aide d'un coulis de ciment ;
- La réparation des épaufrures, situées sur la partie de massif au-dessus du trottoir de cheminement, par repiquage, brossage des éléments désolidarisés, nettoyage et comblement à l'aide d'un mortier de réparation.



Ces aménagements permettront de répondre à l'ensemble des causes de dégradations du massif. En sus de ces aménagements un escalier en béton (intégré dans le confortement) sera mis en œuvre au droit du massif afin de permettre l'accès à la culée en rive droite sans passer par la galerie de visite. L'escalier et le cheminement piéton seront équipés d'une main courante.

Les figures ci-dessous présentent la solution de confortement de la carapace du massif de butée :

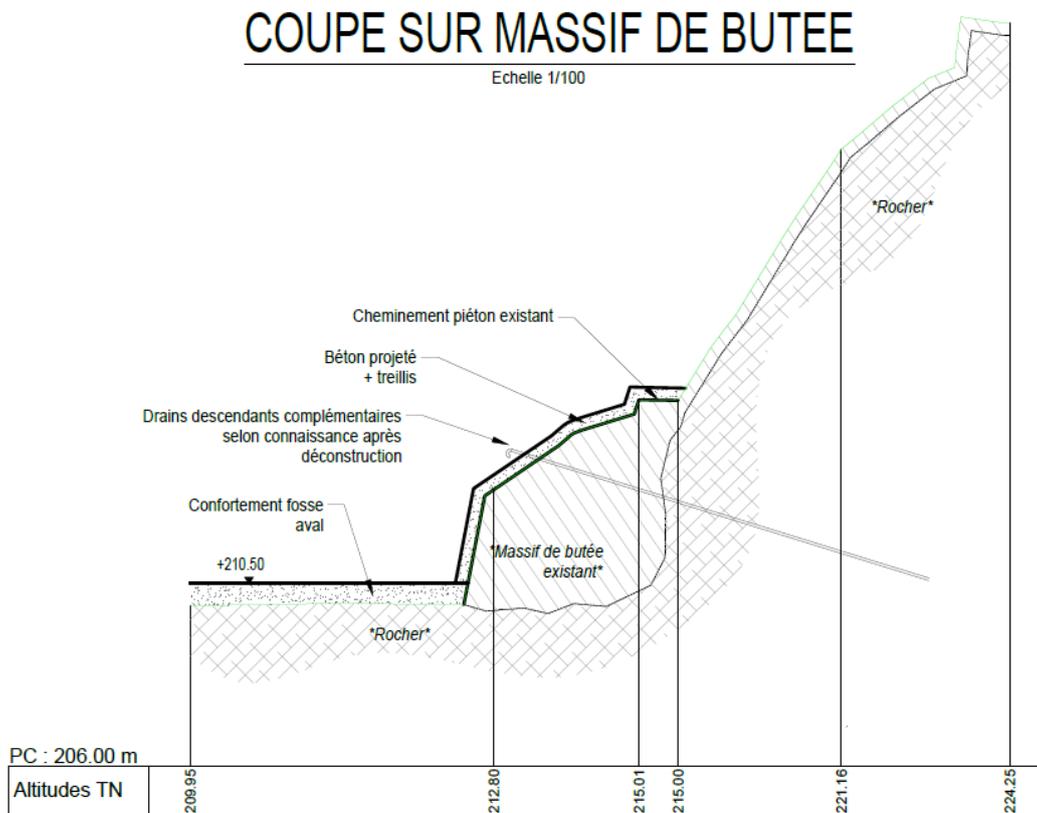


Figure 11: Confortement du massif de butée rive droite envisagé – en coupe (cf. Annexe 3)

Le positionnement des drains descendants sera affiné au moment des travaux sur le massif de butée et plus particulièrement au moment de sa déconstruction partielle.

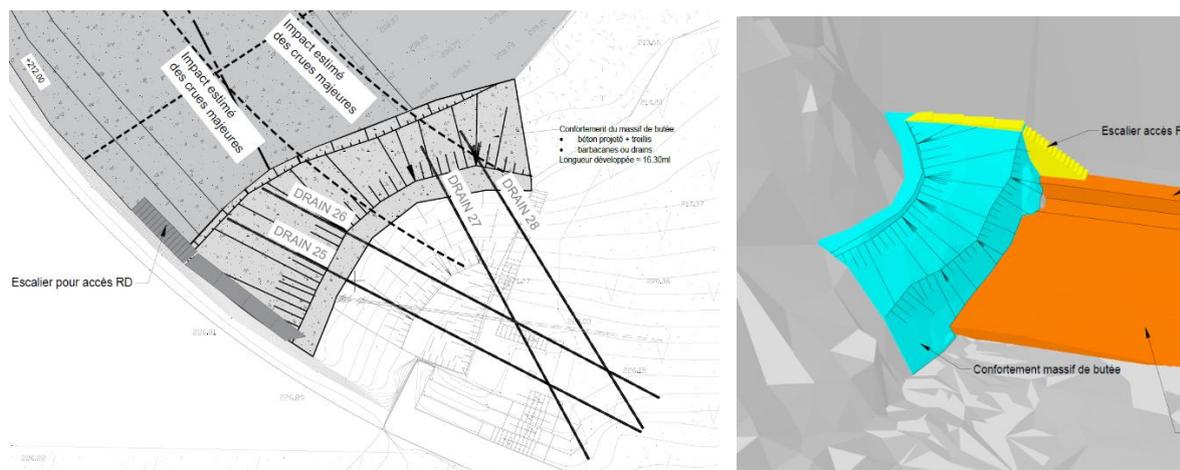


Figure 12: Confortement du massif de butée rive droite envisagé – en vue en plan et en 3D (cf. Annexe 3)



2.5.2 Confortement de la fosse aval

2.5.2.1 Fosse aval Rive Droite

Il a été déterminé en AVP qu'il est nécessaire de réaliser un confortement de la fosse aval rive droite afin de compléter le tapis béton déjà existant en rive gauche.

PRINCIPE DE CONFORTEMENT

Pour apprécier les épaisseurs des tapis de protection à mettre en œuvre, on peut s'appuyer en partie sur le travail réalisé par un groupe technique du CFBR en 1979 présenté au congrès international des grands barrages de New Delhi. Ce travail repose sur le retour d'expérience d'une quarantaine d'ouvrages (voutes ou barrages à contreforts) avec des lames d'eau déversantes plongeantes (dont une vingtaine équipée de dalle de réception en béton).

Les endommagements des dalles (dont l'épaisseur dépassait parfois un mètre) correspondent aux plus fortes puissances surfaciques brutes. Ces dernières ont été calculées de manière simplifiée en considérant la puissance du jet ((ρgQH)) divisée par une surface estimée à partir de la vitesse de chute libre ($\sqrt{2gH}$). Les valeurs correspondantes sont comprises entre 7400 et 22 900 kW/m². À titre de comparaison, pour le barrage des Cambous, un calcul similaire conduirait à des valeurs de l'ordre de 2 300 kW/m² pour un débit de 1080 m³/s associé à une période de retour 1000 ans.

La communication propose quelques recommandations :

- Couvrir l'intégralité de la zone d'impact ;
- Assurer une continuité des formes pour le comportement « hydraulique » du tapis ;
- Disposer d'une épaisseur de béton comprise entre 0,8 et 1,5 m avec une double nappe de ferrailage complétée par des ancrages ;
- Réaliser des ancrages qui s'appuient sur la nappe supérieure du ferrailage,
- Réaliser un parafouille aval de 2 à 3 m de profondeur ;
- Réaliser un réseau de drainage dont l'exutoire doit être situé en dehors de la zone d'impact (ce qui n'est pas le cas pour le tapis existant en rive gauche) ;
- Ménager un joint étanche entre le tapis et le barrage d'une dizaine de mm.

APPLICATION AU BARRAGE DES CAMBOUS

L'application de ces recommandations doit prendre en compte l'écart entre la puissance surfacique brute des cas considérés et celle des Cambous (2300 kW/m²).

Compte tenu des niveaux d'eau et de la puissance du jet, il est proposé de retenir les dispositions suivantes :

- Purge et déroctage superficiel dans l'emprise du futur confortement. Evacuation des matériaux ;
- Protection de l'intégralité de la zone d'impact en rive droite et devant la chambre de restitution aval (environ 14 m x 30 m) ;
- Épaisseur de béton variable avec un minimum de 0,60 m. Les surépaisseurs permettent de tenir compte de la topographie existante et de la purge superficielle ;
- Deux nappes de treillis au sein du tapis (une nappe inférieure et une nappe supérieure) ;
- Ancrages Ø 32 de longueur scellée 4 m espacés d'un mètre en quinconce (soit 1 ancrage par mètre carré). Les têtes des ancrages seront positionnées en nappe haute du tapis ;



- 3 joints longitudinaux (sens amont/aval) avec waterstop et interruption des treillis au droit des joints. Un drainage par demi-coque béton sera réalisé au droit de ces joints. Les demi-coques seront placées entre le béton et le rocher. Des regards de visite seront ajoutés en amont des drains à proximité du cheminement piéton en pied du barrage ;
- 1 drain transversal (en travers de l'écoulement du Gardon) relié aux drains longitudinaux pour faciliter l'écoulement ;
- Une bêche parafouille en aval du tapis, ancrée dans le rocher et comprenant les résurgences des drains. La profondeur de cette bêche sera adaptée en fonction de la qualité du rocher rencontré lors des excavations.

A ce stade des études, il est vérifié que le tapis et les ancrages prévus sont suffisants pour reprendre des sous-pressions qui équivaudraient à la moitié de la charge hydraulique. Il est également rappelé que le tapis sera équipé de drains permettant de limiter ces mêmes sous-pressions.

La sous-pression retenue pour le dimensionnement correspond à une hauteur d'eau de $(227-207)/2 = 10$ m. La pression sous le tapis est donc de $10 \times 10 = 100$ kN/m²

A l'ELU on a $1.35 \times 100 = 135$ kN/m²

La dalle pèse $0.6 \times 25 = 15$ kN/m², la force à reprendre par les ancrages est donc de 120 kN/m².

Un ancrage HA32 est capable de reprendre un effort de $804 \times 435 = 350$ kN, il y a donc un coefficient de sécurité de 2.9 par rapport à l'effort considéré. Ce coefficient de sécurité permet de prendre en compte l'effort de cisaillement sur le tapis induit par le jet.

En ce qui concerne la flexion de la dalle, dans cette configuration avec les efforts considérés, il faudrait une section d'acier d'environ 5.3 cm² en nappe inférieure afin de reprendre la flexion engendrée par les sous-pressions. Il est donc possible de mettre en place un treillis soudés ST65 C en face supérieure et inférieure.

En phase EXE, le tapis sera dimensionné en fonction des reconnaissances géotechniques réalisées dans le cadre de la mission G3 et des hypothèses de dimensionnement qui seront fournies dans le DCE. Le dimensionnement sera validé par des plots d'essais avec notamment un essai d'arrachements sur les ancrages.

Le plan du confortement de la fosse aval est donné en §2.6.

Le tapis béton permettra, en plus de conforter la fosse aval, l'intégration et la protection d'un certain nombre d'équipements d'auscultation tels que drains et collecteur. Il permettra également la circulation tout le long du parement aval du barrage et l'accès à la rive droite (via les escaliers décrits en 2.5.1) sans passer par la galerie de visite.

2.5.2.2 Fosse aval Rive Gauche

Les premiers dépouillements des sondages géotechniques réalisés en aout 2022 dans le tapis RG ont montré que le collage béton/rocher n'est pas parfait sur tous les points de sondages mais que le rocher est peu altéré. Par ailleurs, des aciers ont été retrouvés dans 3 forages sur 4 laissant présager qu'il s'agit d'un ouvrage armé. Par ailleurs, la carapace a très peu évoluée depuis les travaux de 2002.

Pour ces raisons, les travaux à réaliser sur la fosse aval rive gauche consiste à :

- Déconstruire le cheminement piéton existant présent dans l'emprise du tapis existant ;
- Réaliser une nouvelle carapace en béton coulé en place sur le tapis existant :
 - D'épaisseur minimale 30cm ;

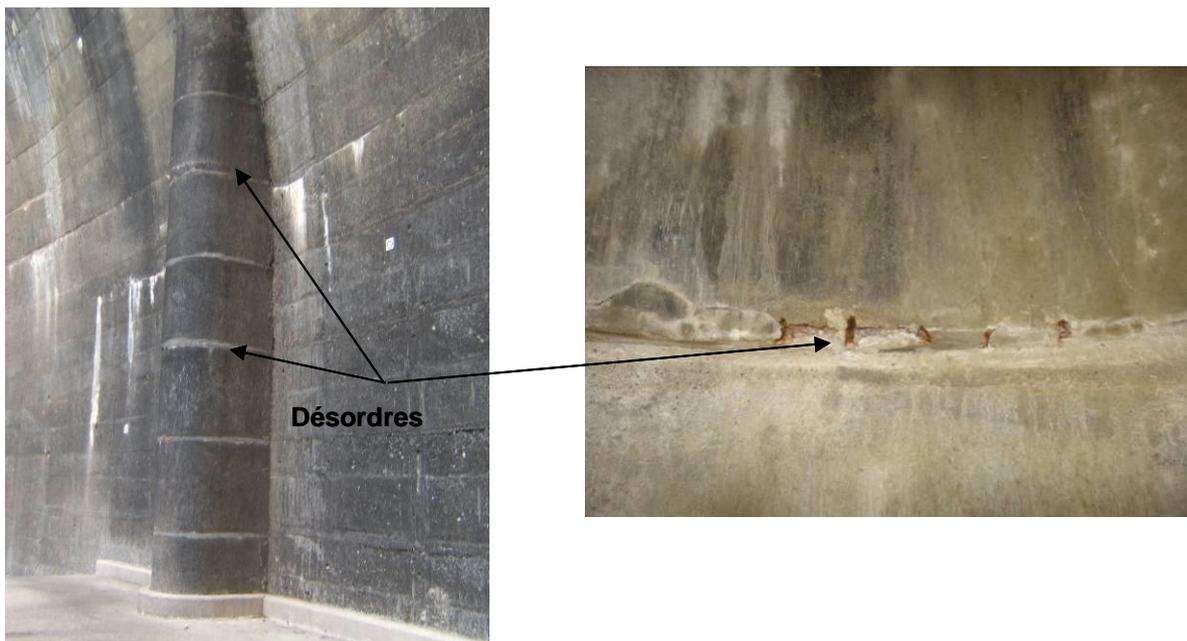


- Avec 2 nappes de treillis soudés en nappe supérieure et inférieure ;
- Ancré au moyen de barres d'ancrage courts $\varnothing 32$ de 2.50m de longueur permettant de solidariser la nouvelle carapace avec la masse rocheuse sous-jacente. Une densité d'un ancrage par mètre carré est retenu ;
- Nettoyer et prolonger les barbacanes existantes ;
- Prolonger les têtes de drains existants pour qu'ils puissent s'intégrer à la surépaisseur de béton de la nouvelle carapace ;
- Reprendre le cheminement piéton déconstruit en l'adaptant à la nouvelle géométrie de la zone (y compris dépose et repose de la main courante existante).

Par ailleurs, ce tapis RG permettra l'intégration et la protection d'un certain nombre d'équipements d'auscultation tels que drains existants, futur collecteur et cellules de pression interstitielle.

2.5.3 Travaux divers

Des travaux de réparation sur plusieurs désordres mineurs (épaufures) sont également prévus sur le barrage (cheminée aval, massif de butée rive gauche et parement aval). Ces désordres ont été repérés lors de l'Examen Technique Complet (ETC) de 2012. Ils sont localisés sur le massif en rive gauche et sur la cheminée aval. Les désordres seront réparés par repiquage, retrait des éléments désolidarisés, nettoyage et comblement à l'aide d'un mortier de réparation.



Figures 13: Photos de l'ETC de 2012 des désordres sur la cheminée aval vues de l'extérieur et de l'intérieur



Figure 14: Photos récentes des désordres sur le massif rive gauche

2.6 AMELIORATION DES DISPOSITIFS D'AUSCULTATION

Les dispositifs d'auscultation à mettre en place et leurs implantations sont donnés sur la Figure 16 (cf. plan n°A00593P03-1- Pièce 06 fourni en Annexe de ce rapport).

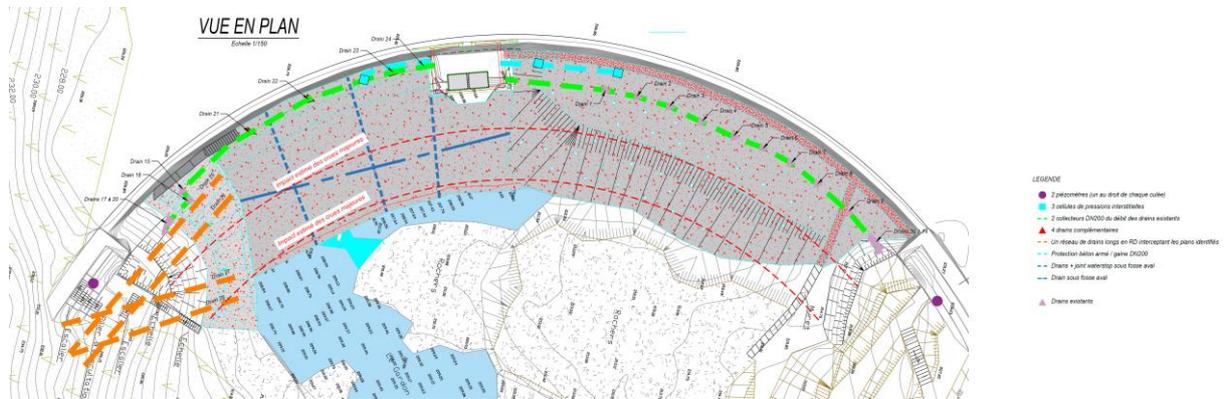


Figure 15 : Implantation des dispositifs d'auscultation (vue en plan)



Figure 16 : Implantation des dispositifs d'auscultation (profils en long)

Nb : l'abandon des extensomètres a été acté en phase AVP (cf. [15]).

2.6.1 Pour le suivi de la déformation du barrage

2.6.1.1 Pendule inversé en pied de barrage

DEFINITION DU DISPOSITIF

Il est tout d'abord rappelé qu'un pendule inversé est en place sur le barrage, celui-ci permet de mesurer le déplacement relatif (déplacement horizontal sur x et y) entre la crête du barrage et le pied du barrage.

Cependant, il est jugé nécessaire d'ajouter un deuxième pendule inversé, ancré dans le rocher dans le but de mesurer le déplacement absolu du barrage par rapport à sa fondation.

La figure ci-dessous précise les différents éléments composant ce pendule inversé. Ils sont également décrits ci-dessous :

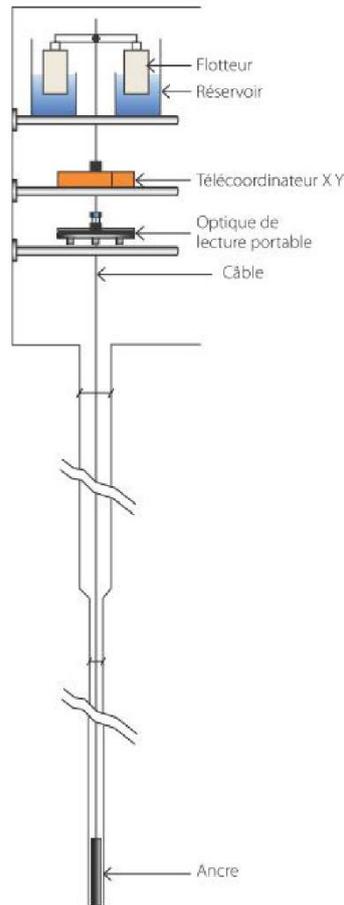


Figure 17 : Principe du pendule inversé

Le pendule inversé est donc composé de :

- Un flotteur en polypropylène et un réservoir d'eau. Les dimensions du réservoir sont généralement de l'ordre de 50x50x50 cm ;
- Un appareil de mesure électronique (facultatif) ;
- Un appareil de mesure manuel comportant une table et un support. (cf figure ci-dessous) avec des dimensions de l'ordre de 50x50 cm.

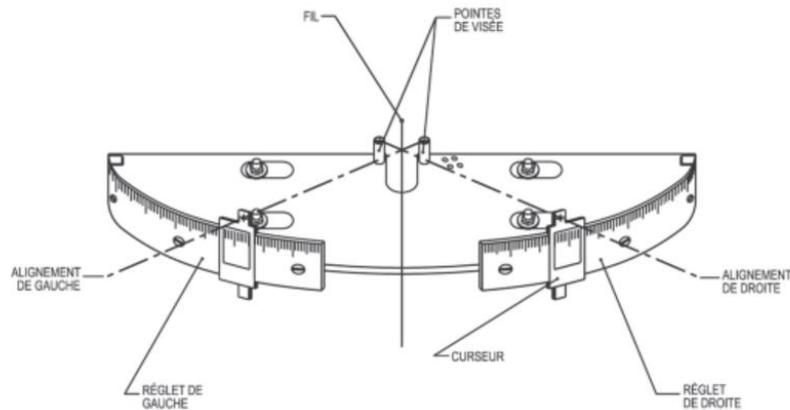


Figure 18 : Table de mesure



- Un fil tendu en acier inoxydable ;
- Un ancrage au niveau du rocher, nécessitant un forage carotté (dont les carottes seront récupérées afin de déterminer précisément la position de l'ancrage).

MOYENS DE MISE EN ŒUVRE

Le pendule sera foré et mis en place à l'aide d'un outillage manuable, cet outillage sera similaire à celui ayant servi aux reconnaissances géotechniques réalisés en 2020 sur le barrage [3]. La Figure 19 montre la machine de forage (carotteuse électrique Hilti 350) utilisée pour effectuer les carottages géotechniques en 2020 (\varnothing 100 mm et jusqu'à 20 m de profondeur).

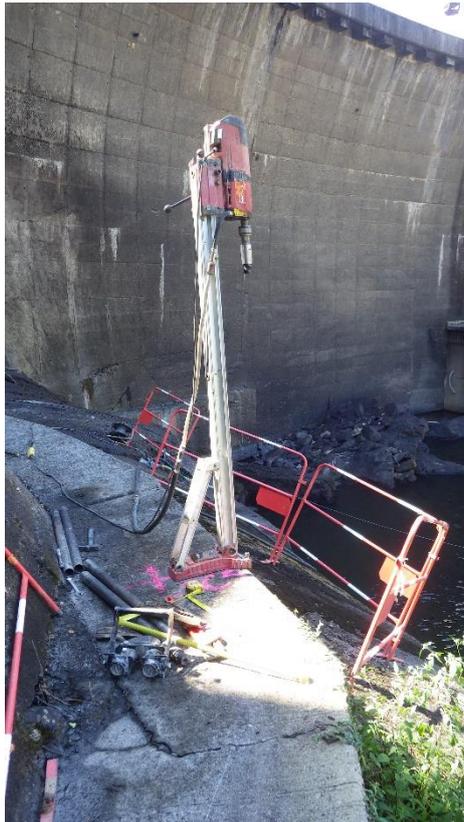


Figure 19: Machine de forage carotteuse électrique Hilti 350

Selon sa fiche technique, le poids de cette machine est de 35 kg, elle est donc manuable. De plus, elle est capable de forer jusqu'à un diamètre de 500 mm. Elle sera également utilisée pour mettre en œuvre les piézomètres décrits en 2.6.2.1.

La position du futur pendule figure sur les plans PRO. La longueur du forage sera déterminée en phase travaux.

Nb : L'opportunité d'installer un pendule inversé dans la culée RG a fait l'objet de discussions en groupe technique MOA/AMO/MOE. Elle a abouti à la conclusion que le suivi topométrique et des vinchons étaient suffisamment adaptés au contexte de l'ouvrage. Par ailleurs, l'installation de nouveaux piézomètres (1 sur chaque culée) permettra de renseigner sur les niveaux de sous-pressions s'établissant sous cette partie d'ouvrage.



2.6.1.2 Vinchons

Afin de confirmer les mesures des vinchons actuels, il est proposé de mettre en place **deux nouveaux vinchons (★)** (cf Figure 21) **par rive** entre le barrage et les culées à proximité de ceux déjà installés, soit au niveau des joints A, entre le barrage et la culée RD, et au niveau du joint I, entre le barrage et la culée RG.



Figure 20: Vinchons existant et position des nouveaux vinchons au droit des joints A et I en galerie du barrage

En complément, il est proposé de mettre **quatre vinchons supplémentaires (★)** au niveau des **joints C, D, E et F** qui permettront de mesurer les déplacements entre plots là où la hauteur du barrage est la plus haute. Ces dispositifs permettront l'évaluation des déplacements relatifs des plots CD, DE et EF pour lesquels les calculs de stabilité ont démontré un point de vigilance [1].

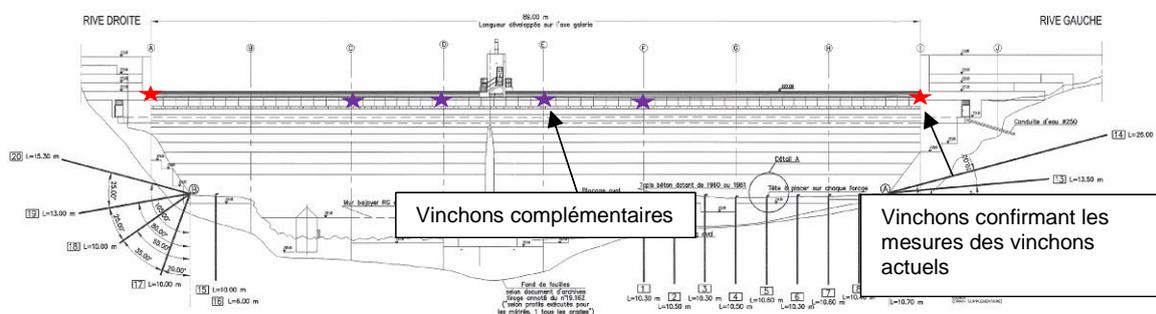


Figure 21: Implantation des nouveaux vinchons en galerie du barrage

Les vinchons seront constitués de deux pièces en inox peintes dans lesquelles sont insérées dans trois axes trois couples de touches de mesures à bouts sphériques, elles aussi en acier inoxydable pour positionner les becs du pied à coulisse de l'exploitant.

Les vinchons seront installés de manière à ce que la mesure du rejet (mesure amont/aval) soit facilitée. En effet, il est connu que la prise de mesures dans cette direction sur les vinchons existants est difficile compte tenu :

- D'un manque de place pour placer correctement le pied à coulisse ;
- D'un léger décalage entre les deux ergots de mesure.

Le béton à l'arrière pourra être légèrement surcreusé pour permettre le positionnement du pied à coulisse le plus droit possible.



2.6.2 Pour le suivi des pressions interstitielles

2.6.2.1 Piézomètres

Deux piézomètres seront installés respectivement sur la culée rive gauche et la culée rive droite à l'aide de forages carottés. Ces piézomètres pourront être lus soit à la sonde soit en pression (manomètre). Leur position (en hauteur) sur les culées permettra une lecture par tout temps en cas de déversement ou non. Un accès sécurisé sera mis en place pour y accéder en toute sécurité.

En première approche, ils auront une profondeur identique aux dispositifs de drainage actuel, ils seront mis en œuvre à l'aide de la foreuse décrite en 2.6.1.1.

En tout état de cause, les nouveaux dispositifs devront respecter à minima les prescriptions suivantes :

- Présence de sable allant du pied du forage jusqu'à 50 cm au moins au-dessus de la partie crépinée du tube ;
- Présence d'un bouchon étanche, 2m au moins au-dessus de la base du tube plein et de hauteur suffisante.

Les têtes des piézomètres en inox devront être correctement scellées au niveau de la dalle béton pour éviter les fuites. Les tubes dépasseront verticalement du radier sur une hauteur d'environ 80-100 cm.

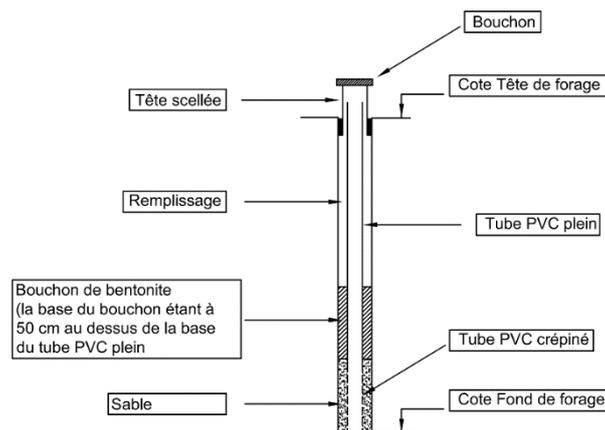


Figure 22 : Configuration théorique d'un piézomètre

Il convient de noter que des tests d'absorption de type Lugeon seront réalisés durant l'exécution de chaque forage afin de caractériser précisément les zones de la fondation du barrage que l'on souhaite ausculter à terme. Un minimum d'un essai tous les 2 mètres sera à réaliser dans chaque forage afin de déterminer au mieux la future position des parties crépinées des piézomètres. Les essais seront menés par l'intermédiaire d'une chambre de mesure courte d'un (1) mètre. D'une manière générale, on ne dépassera pas trois (3) mètres de passe pour la chambre de mesure. L'enregistrement de la perméabilité permettra de définir précisément l'altimétrie des parties crépinées des piézomètres et donc leur longueur totale. Les longueurs et implantations annoncées à l'heure actuelle ne sont donc que purement théoriques.

En première approche, il est proposé de retenir les caractéristiques principales suivantes pour les futurs piézomètres :

- Diamètre des forages : 86 mm ;
- Piézomètres en tubes PVC 41/48 mm, avec filetage gaz ;
- Partie crépinée du tube PVC avec des fentes de 0.5mm ;



- Le bouchon étanche peut être composé de billes de sobranite sur une hauteur de 1 à 2 m ;
- De la partie supérieure du bouchon étanche jusqu'au niveau de l'attaque du forage, l'espace entre le tube et la paroi du forage est comblé par un coulis de ciment ;
- Les têtes de piézomètres sont constituées de tubes inox.

La mise en œuvre des piézomètres pourra nécessiter le démontage d'une partie des garde-corps des escaliers afin d'accéder facilement à la zone de forage (comme ce sera le cas en culée rive droite cf. Figure 23). En fin d'installation, un accès sécurisé permanent sera à créer pour permettre l'accès à ces piézomètres.



Figure 23 : Visualisation de l'implantation du piézomètre sur la culée rive droite (cote de forage : 228.00 m NGF)



Figure 24 : Visualisation de l'implantation du piézomètre sur la culée rive gauche (cote de forage : 227.00 m NGF)



2.6.2.2 Cellules de pressions interstitielles

Trois cellules de pressions interstitielles à corde vibrante seront mises en place au niveau des plots centraux (cf. Réf [15]). Pour rappel l'implantation est définie sur la Figure 16.

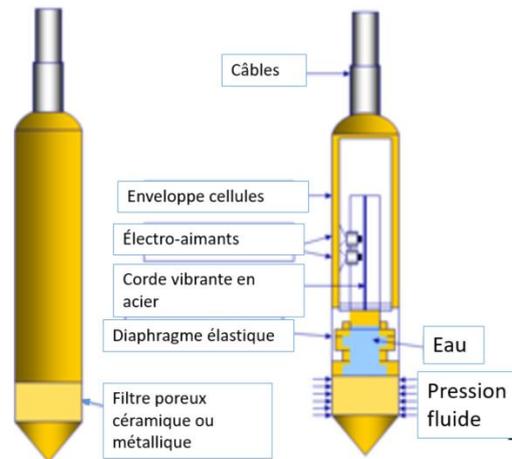


Figure 25 : Parties d'une cellule de pression interstitielle à corde vibrante

WORKING
PRINCIPLE

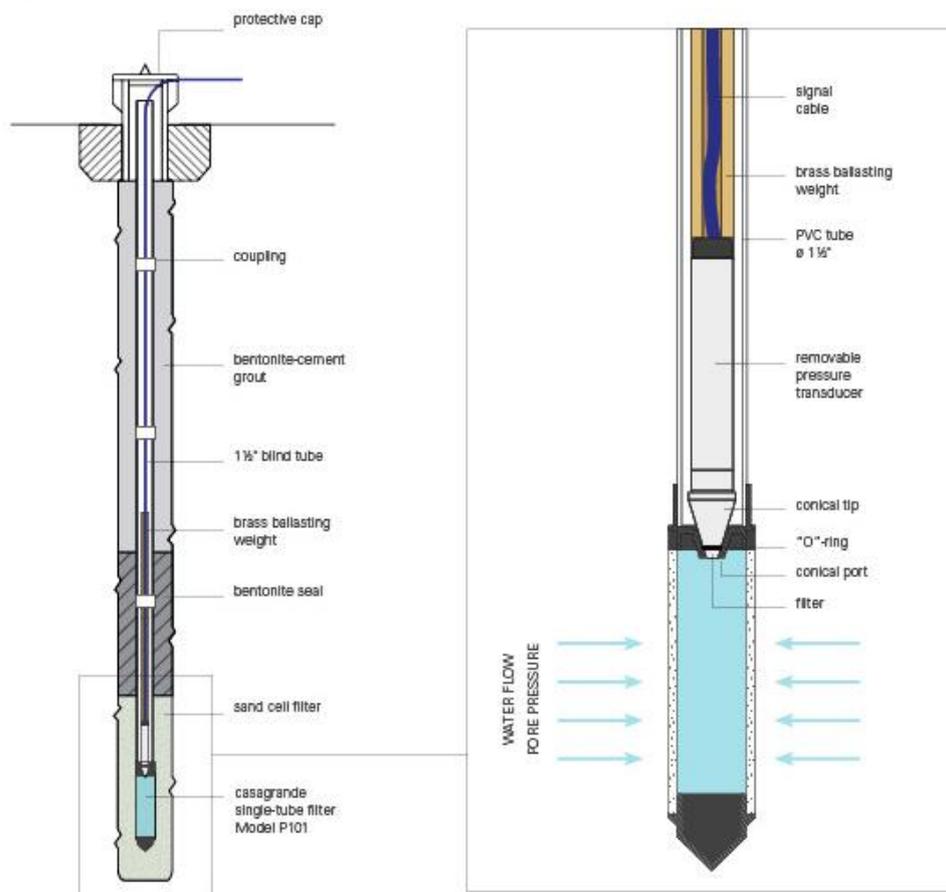


Figure 26 : Cellules de pressions interstitielles



Chaque cellule de pression interstitielle sera mise en œuvre dans un forage carotté similaire au forage du piézomètre décrit en §2.6.2.1. La cellule est composée de différents éléments tel qu'indiqué sur les figures ci-dessus. Son principe de fonctionnement est le suivant : le liquide pénètre dans la cellule et vient comprimer la membrane élastique, ce qui détend la corde, les électro-aimants envoient alors un signal électromagnétique vers la centrale d'acquisition et de traitement des données. La plage de mesure de ces dispositifs sera de 0 – 2 bars soit 0 – 0.2 MPa.

Il est à noter que les câbles envoyant le signal vers la centrale d'acquisition seront :

- Mis en place dans une conduite/gaine directement intégrée dans le confortement de la fosse aval rive droite ;
- Mis en place dans une conduite/gaine directement intégrée dans la surépaisseur de 30cm prévue par-dessus la carapace existante.

Dans les deux cas, la protection mécanique sera donc apportée par les confortements en béton prévus en rive droite et rive gauche (cf. Figure 15). Ces gaines déboucheront respectivement sur les faces latérales rive droite et rive gauche du nouveau local. Les câbles seront protégés mécaniquement à l'intérieur du local et remonteront jusqu'en galerie de l'ouvrage via le puits d'accès. La centrale d'acquisition sera positionnée en entrée rive gauche du barrage.

Ce dispositif permettra de mesurer les sous-pressions au droit des plots de plus grandes hauteurs, cela permettra de compléter les données issues de l'auscultation des vinchons, des pendules et des campagnes topographiques.

Le forage sera équipé d'un bouchon en tête permettant sa fermeture tout en permettant le passage du câble.

Le positionnement schématique est le suivant :

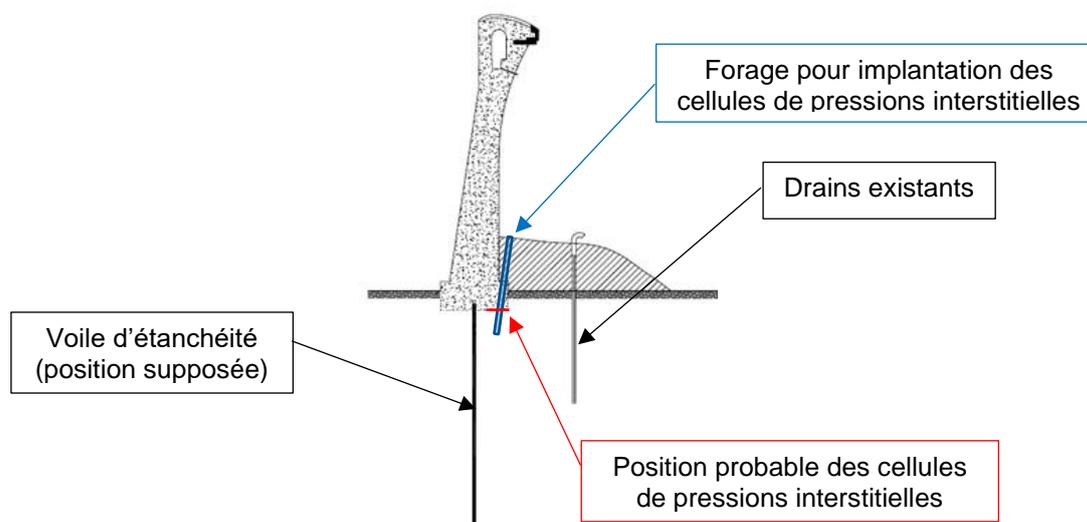


Figure 27 : Schéma d'implantation des cellules

Il est cependant à noter que : ni la configuration du voile d'étanchéité, ni celle de l'ancrage du barrage dans la fondation rocheuse en dehors de la chambre aval ne sont connues avec exactitude. Compte tenu de ces éléments, les travaux de forage devront donc être suivis minutieusement (il conviendra de bien identifier la position du contact béton/rocher pour ne pas trop forer en dessous de ce contact). Des carottes régulières pourront être remontées et inspectées afin de situer la zone dans laquelle se situe l'extrémité basse du forage pour éviter toute dégradation du voile d'étanchéité. L'angle du forage devra être faible de l'ordre de 5 à 10° ce qui permettra de limiter fortement le risque d'intercepter le voile d'étanchéité en limitant le forage à au plus 1 m sous le contact béton/rocher. Des imageries de paroi seront réalisées dans chacun des forages.



La réalisation de ces forages, l'atteinte du contact béton/rocher et l'analyse des imageries de paroi feront l'objet de points d'arrêt pour prise de décision. Les travaux seront réalisés lors de l'abaissement du plan d'eau à la cote de 224 m NGF.

Nota : la zone potentielle d'apparition de fissure correspond à la zone de pose de la cellule. Le trait bleu sur la Figure 27 est le forage de pose de la cellule.

2.6.2.3 Réseaux de drains complémentaires/supplémentaires

Plusieurs types de drains complémentaires sont à mettre en place :

- Quatre drains complémentaires (drains n°21, 22, 23 et 24) de diamètre DN100 et d'une dizaine de mètre de longueur sont à mettre en place en rive droite au niveau de la fosse du barrage. Ces drains seront intégrés dans le confortement de la fosse aval en rive droite, leur débit transitera jusqu'à la chambre aval à l'aide d'un collecteur (cf. plan n°A00593P03-1-Pièce 06 fourni en Annexe de ce rapport). Les éléments concernant le collecteur sont détaillés dans la partie §2.6.2.4.
- Quatre drains longs descendants interceptant les plans identifiés dans la note de stabilité compléteront le dispositif existant au niveau du massif RD (drains n°25, 26, 27, 28 – cf. plan n°A00593P01-1-Pièce 06 fourni en Annexe de ce rapport).

La réalisation de ces drains longs doit également intégrer les contraintes suivantes :

- Tenir compte des plans à drainer en fondation mais aussi des résurgences constatées lors de la déconstruction de l'existant (ce qui imposera en partie l'orientation des dispositifs).

Les plans à drainer sont ceux répertoriés dans la note de calcul de stabilité du barrage lors de l'étude de stabilité du coin rocheux en RD. Ces plans sont rappelés sur la figure ci-dessous.

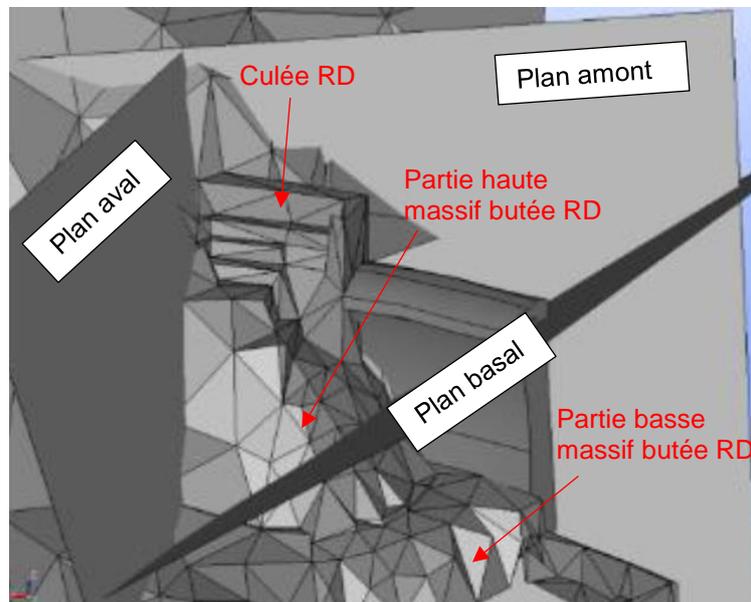


Figure 28 : Plans définissant le coin rocheux le plus critique

Lors de l'inspection visuelle réalisée le 02/09/2020, il a été constaté des venues d'eau sur la partie basse du massif de butée RD (cf. cercles rouge sur les photos ci-dessous)

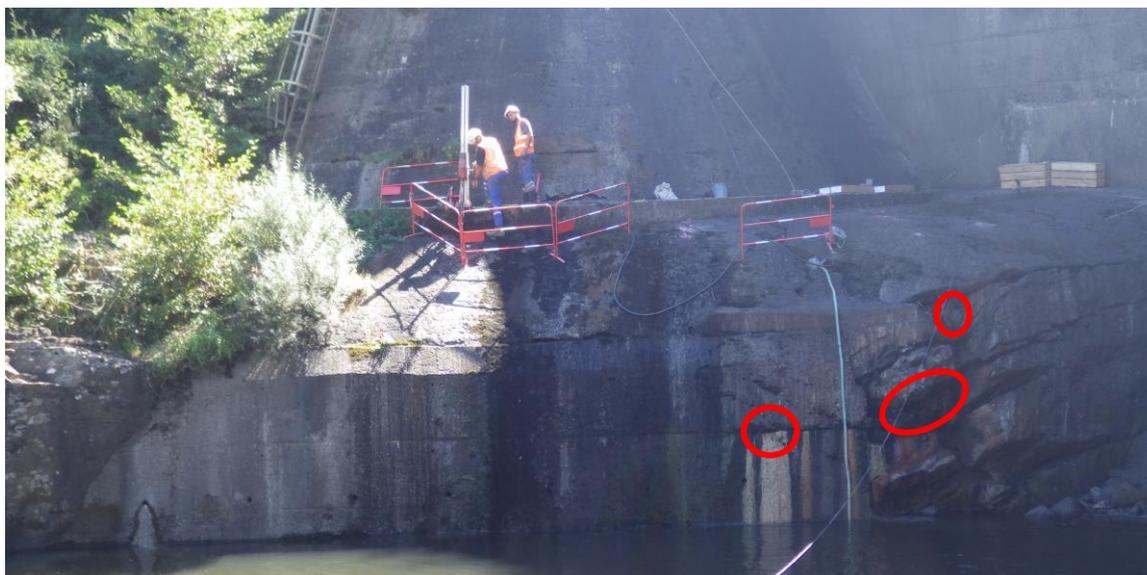


Figure 29 : Résurgences constatées sur le massif de butée RD

Compte tenu de la position de ces résurgences et des plans de glissement, il pourrait être envisagé en première approche deux drains longs dont les exutoires seraient approximativement situés au niveau des cercles rouge et dont l'orientation permettrait d'aller chercher le plan aval. Le plan amont n'étant pas envisageable au risque de forer à travers la voûte du barrage.

Afin d'envisager un drainage du plan de glissement amont et basal, et bien que plus complexe, deux autres drains longs pourraient être forés depuis un point plus aval sur le massif de butée RD :

- Soit depuis la partie haute du massif de butée (cercles jaune sur la photo ci-dessous) ;
- Soit une nouvelle fois depuis la partie basse du massif de butée (cercles bleu sur la photo ci-dessous).

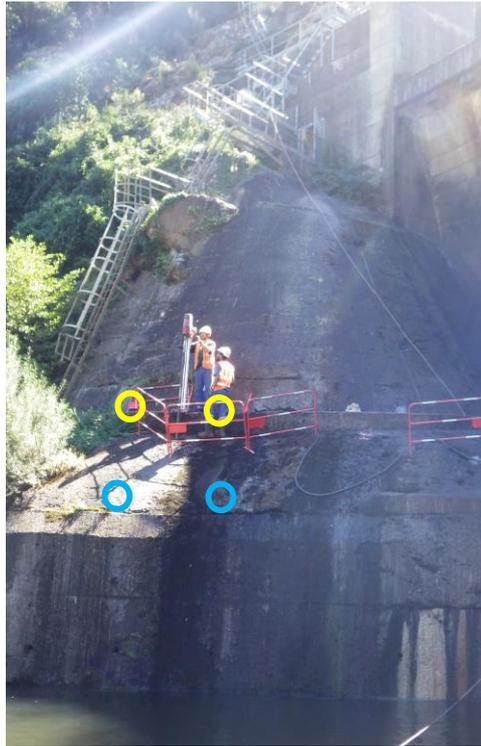


Figure 30 : Implantation envisageable pour les drains longs plus en aval

Les inclinaisons de ces drains seront également différentes afin d'éviter tout chevauchement/croisement entre eux.

- Tenir compte de la zone d'impact du jet du seuil déversant ;
L'impact estimé des crues majeures est représenté sur la figure ci-après. Sur cette même figure sont également matérialisés les plans de glissement amont et aval ainsi que les positions des drains évoquées au point précédent.
- Tenir compte de la manœuvrabilité de la foreuse.

Le choix de la machine de forage par l'entreprise en charge des travaux orientera également en partie la position et l'orientation des forages. L'utilisation d'un engin lourd sur chenille ou d'un outillage « portatif » nécessitera selon les cas l'aménagement de plateformes dédiées et aménagées pour permettre la mise en station.

En tout état de cause, les implantations actuelles sont théoriques. Elles seront affinées lors des travaux pour tenir compte des dernières constatations sur site. Ces implantations seront validées par le MOE avant réalisation des forages (point d'arrêt).

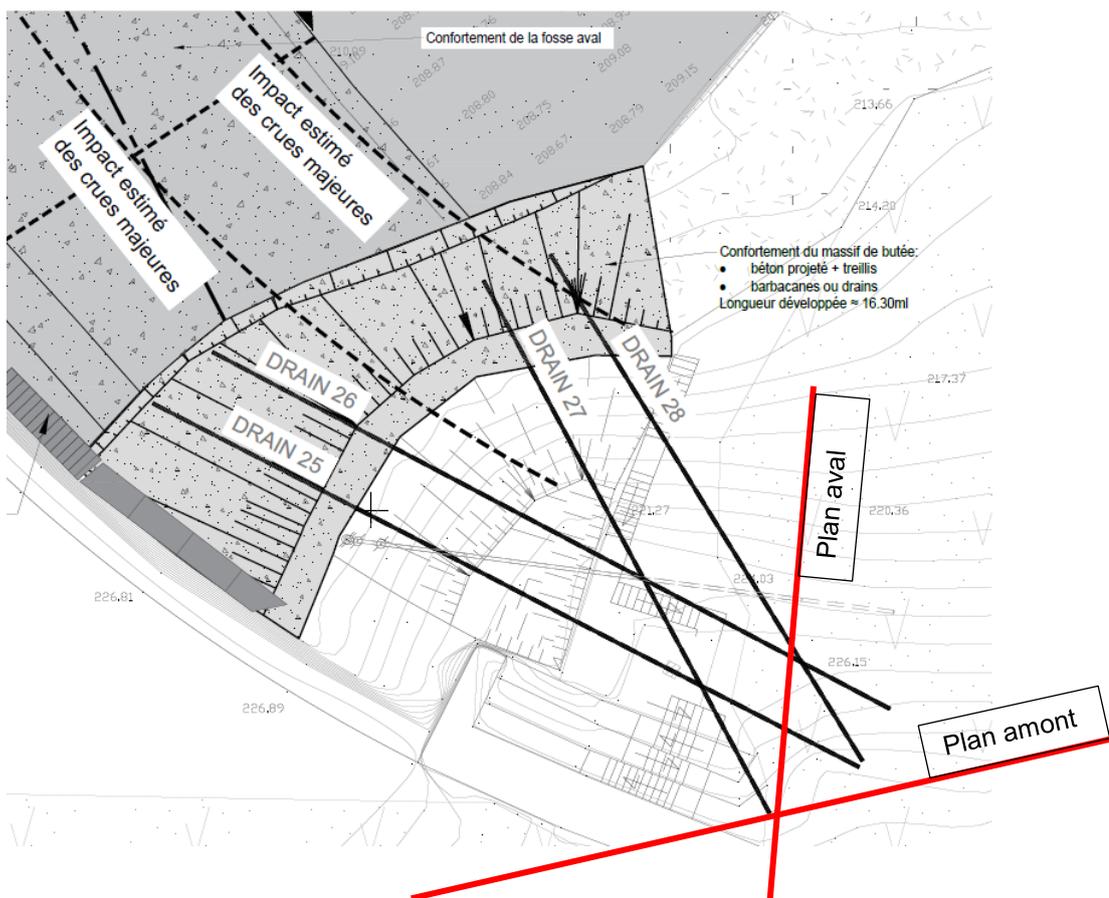


Figure 31 : Impact estimé des crues majeures et implantation envisageable pour les drains longs

L'orientation des drains et la présence d'un col de cygne en sortie de drain permettent de limiter le risque d'entrée de pression hydrodynamique en cas de surverse.

Il est à noter que les drains déjà existants seront également adaptés, les têtes des drains seront surmontées par des bouchons verrouillables avec filetage en acier galvanisé (tête de drains dans le même matériau). La nouvelle configuration ne permettra plus la mesure individuelle des débits. En revanche, dans le cas de drains non débitants, la mesure individuelle en piézométrie restera possible.

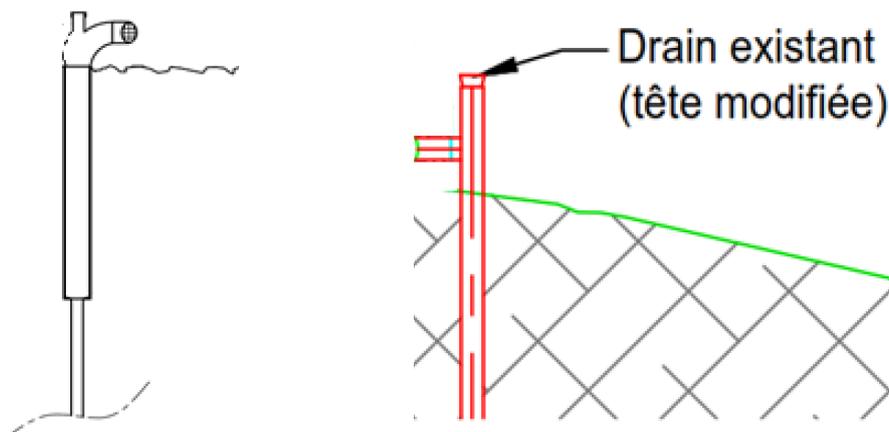


Figure 32 : Représentation schématique avant/après des drains



À titre d'information, nous rappelons ci-dessous les niveaux de débit ou les niveaux piézométriques mesurées actuellement sur les dispositifs existants (hors surverse sur le seuil) :

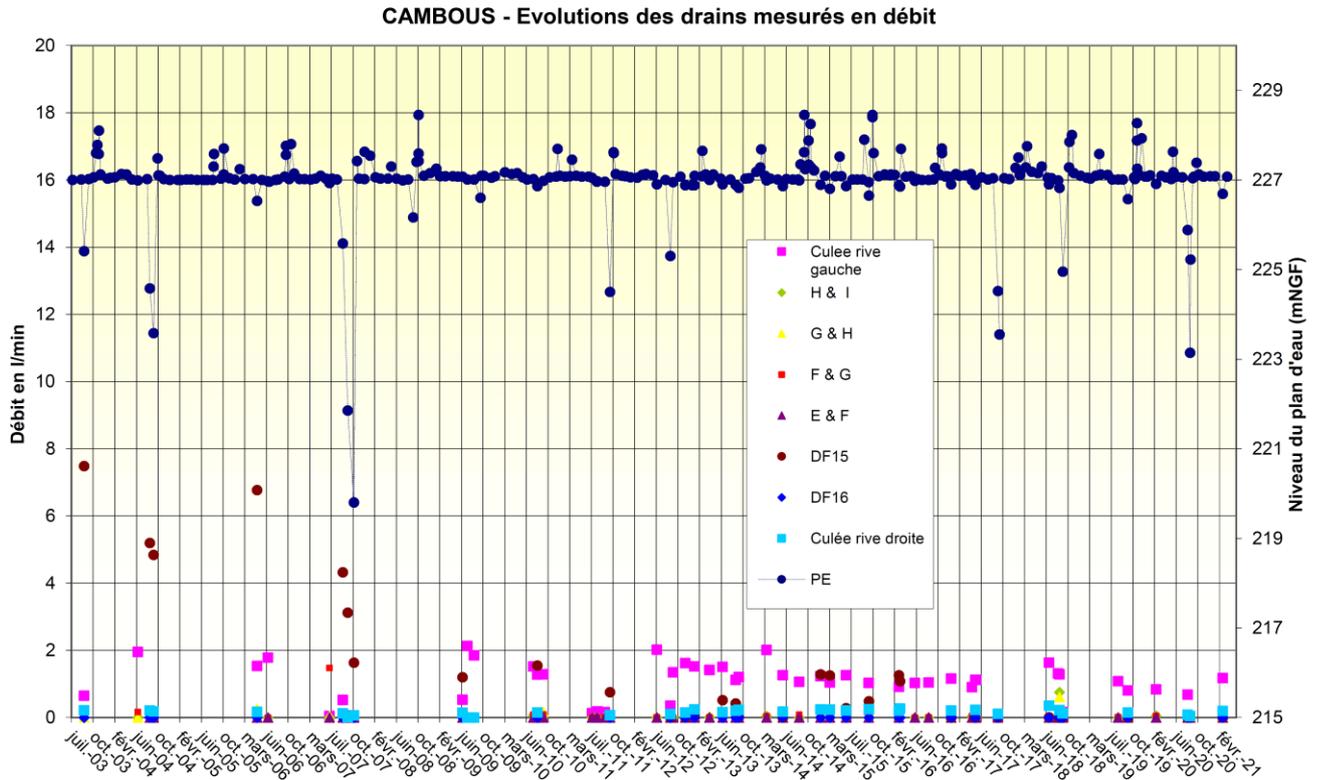


Figure 33 : Graphique des mesures des drains en débit 2003-2021

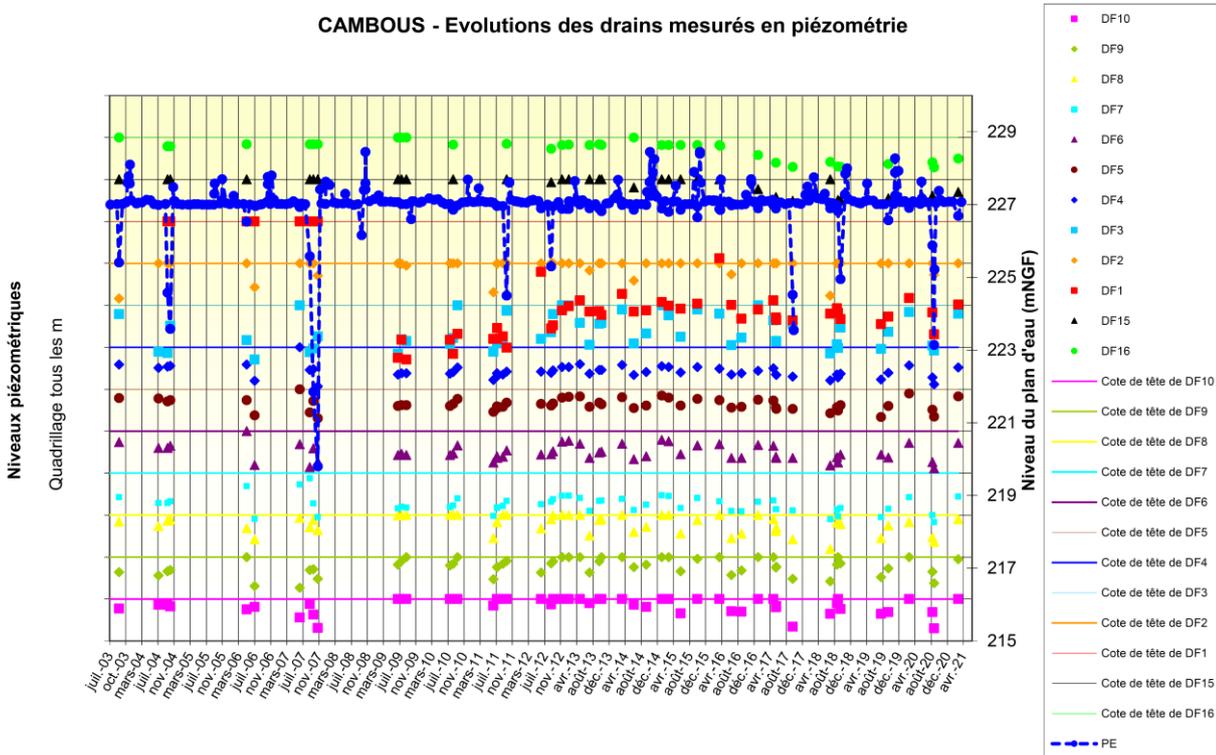


Figure 34 : Graphique des mesures des drains en piézométrie 2003-2021

Pour rappel les implantations de ces drains sont définies sur la Figure 16.

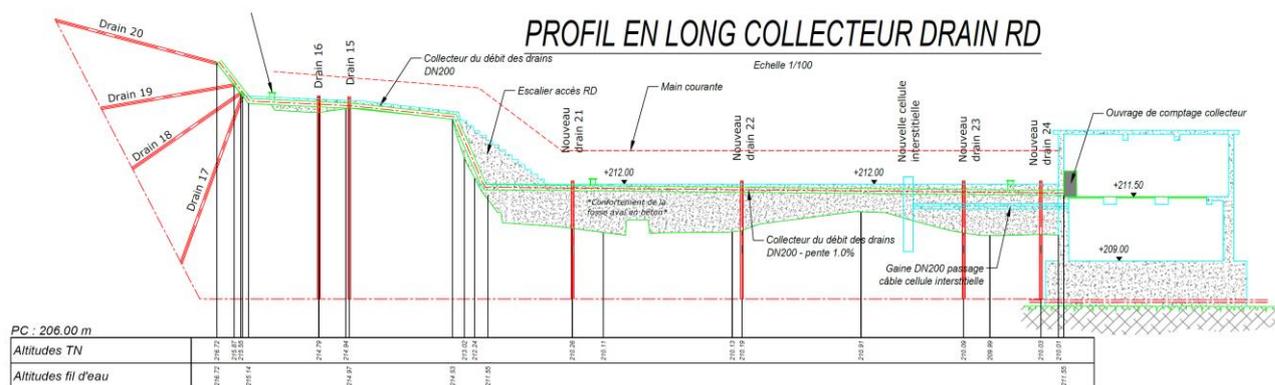


Figure 35 : Coupe sur drain complémentaire en rive droite



Figures 36 : Photos des drains existants en rive gauche (dont les têtes sont à modifier)



2.6.2.4 Collecteurs et déversoir triangulaire à parois minces

Il est proposé la mise en place de deux collecteurs de drains constitués d'une conduite acier DN200 permettant de faire transiter à minima un débit de l'ordre de 10 L/min chacun (valeur correspondant au débit de drainage cumulé maximal relevé sur site depuis 2003, hors barrage déversant) :

- Côté rive gauche de la chambre aval :
 - La conduite sera placée à l'intérieur de la surépaisseur de 30cm de béton prévue sur la carapace existante et permettra, moyennant la reprise des têtes de drains existants, de collecter les débits de drainage des dispositifs situés sur la fosse aval RG ;
 - La conduite sera prolongée le long du massif de butée RG afin d'intégrer également les débits de drainage des dispositifs situés sur le massif de butée (i.e. drains 10 à 14). Cette portion de conduite sera ancrée dans le massif de butée RG et sera protégée mécaniquement contre la surverse et le risque de chutes d'embâcles par une protection en béton armée. Les têtes de drains existants devront également être reprises en conséquence ;
- Côté rive droite :
 - La conduite sera noyée dans le béton du confortement de la fosse aval et recueillera les débits de drainage des nouveaux dispositifs (i.e. drains 21 à 24) ;
 - La conduite sera prolongée le long du massif de butée RD afin d'intégrer également les débits de drainage des dispositifs situés sur le massif de butée (i.e. drains 15 à 20). Cette portion de conduite sera :
 - Noyée dans la future carapace du massif de butée RD (pour les drains 15 et 16 situés sur la partie inférieure du massif) ;
 - Ancrée dans le massif de butée RD et protégée mécaniquement contre la surverse et le risque de chutes d'embâcles par une protection en béton armée (pour les drains 17 à 20 situés sur la partie supérieure du massif).

Les têtes de drains existants devront également être reprises en conséquence.

Les détails des collecteurs en rive gauche et rive droite sont donnés ci-après :

COLLECTEUR COTE RIVE GAUCHE

Le profil en long du collecteur est donné ci-dessous. On peut y voir que sur certaines zones il sera nécessaire de réaliser et reboucher une saignée dans le tapis du béton anti-affouillement pour conserver un écoulement gravitaire. La pente du collecteur rive gauche est de 3.5%, pour un diamètre de 200 mm, soit un débit maximal de l'ordre de 50 L/s.

$$Q = k \times S \times (R_h)^{2/3} \times \sqrt{i} \quad \text{Formule de Manning – Strickler}$$

Avec :

- Q : débit en m³/s ;
- K : le coefficient de Manning-Strickler ;
- S : la surface mouillée en m² (= Aire mouillée / Périmètre mouillée) ;
- R_h : le rayon hydraulique en m ;
- i : la pente en m/m.

Nous retenons la conduite remplie au trois-quarts (i.e. avec une hauteur d'eau de 0.15m dans la conduite).

$$Q = 75 \times 0.025 \times \left(\frac{0.025}{0.418}\right)^{2/3} \times \sqrt{0.035} = 0.050 \text{ m}^3/\text{s} = \mathbf{50 \text{ L/s}}$$



**PROFIL EN LONG COLLECTEUR
DRAIN RG**

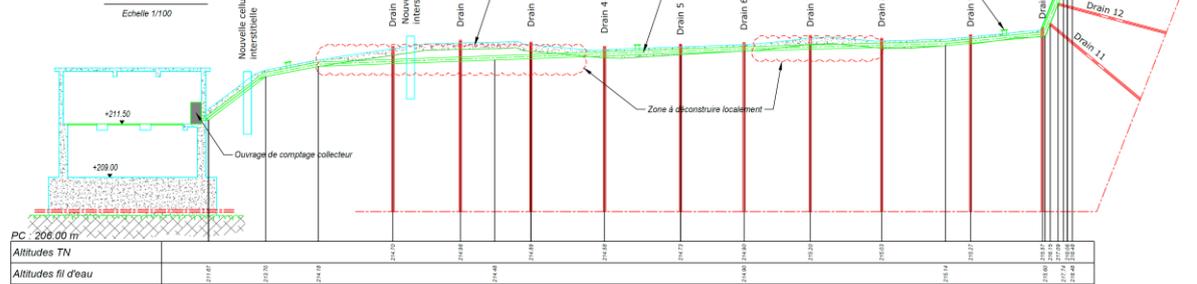


Figure 37 : Profil en long du collecteur en rive gauche (cf. Annexe 3)

COLLECTEUR COTE RIVE DROITE

Le collecteur côté rive droite sera noyé dans le béton, le profil en long de ce collecteur est donné ci-après. La pente sera à minima de 1%, pour un diamètre de 200 mm, soit un débit maximal de l'ordre de 30 L/s.

$$Q = 75 \times 0.025 \times \left(\frac{0.025}{0.418}\right)^{2/3} \times \sqrt{0.010} = 0.030 \text{ m}^3/\text{s} = 30 \text{ L/s}$$

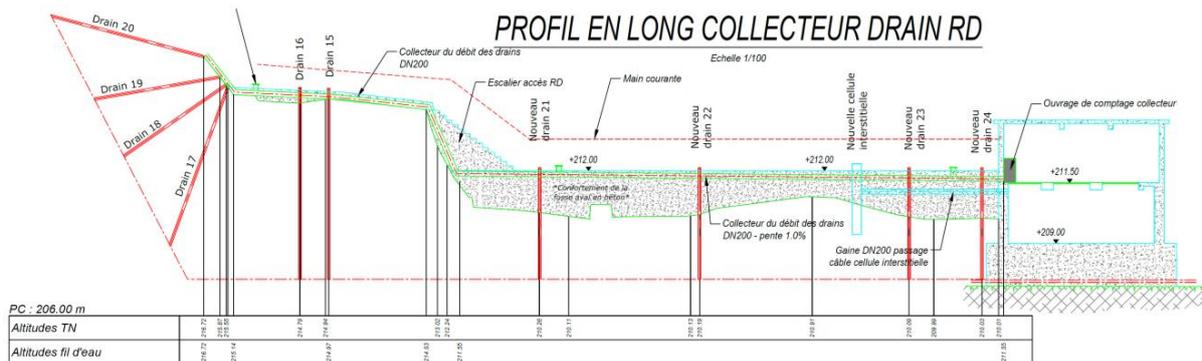


Figure 38 : Profil en long du collecteur en rive droite (cf. Annexe 3)

Les détails des drains sont donnés dans le dossier de plans.

Nota : Le débit maximum mesuré depuis 2003 sur l'ensemble des drains, lorsque la mesure a été possible, à savoir en l'absence de surverse sur le barrage, est aujourd'hui de 10 L/min, ce qui représente environ 0,17 L/s. Une marge de sécurité importante est donc prise dans le dimensionnement des collecteurs.

DEVERSOIR TRIANGULAIRE EN MINCE PAROI

Les deux ouvrages (un par rive) de comptage du débit seront de type « Déversoir triangulaire en mince paroi », avec un demi-angle d'échancrure de $\theta/2 = 1/8$ soit environ 7°. Cet ouvrage permettra de mesurer des débits de 0 à 7m³/h, plage de mesure suffisante au vu de la somme des débits mesurés actuellement de l'ordre de 10 L/min.

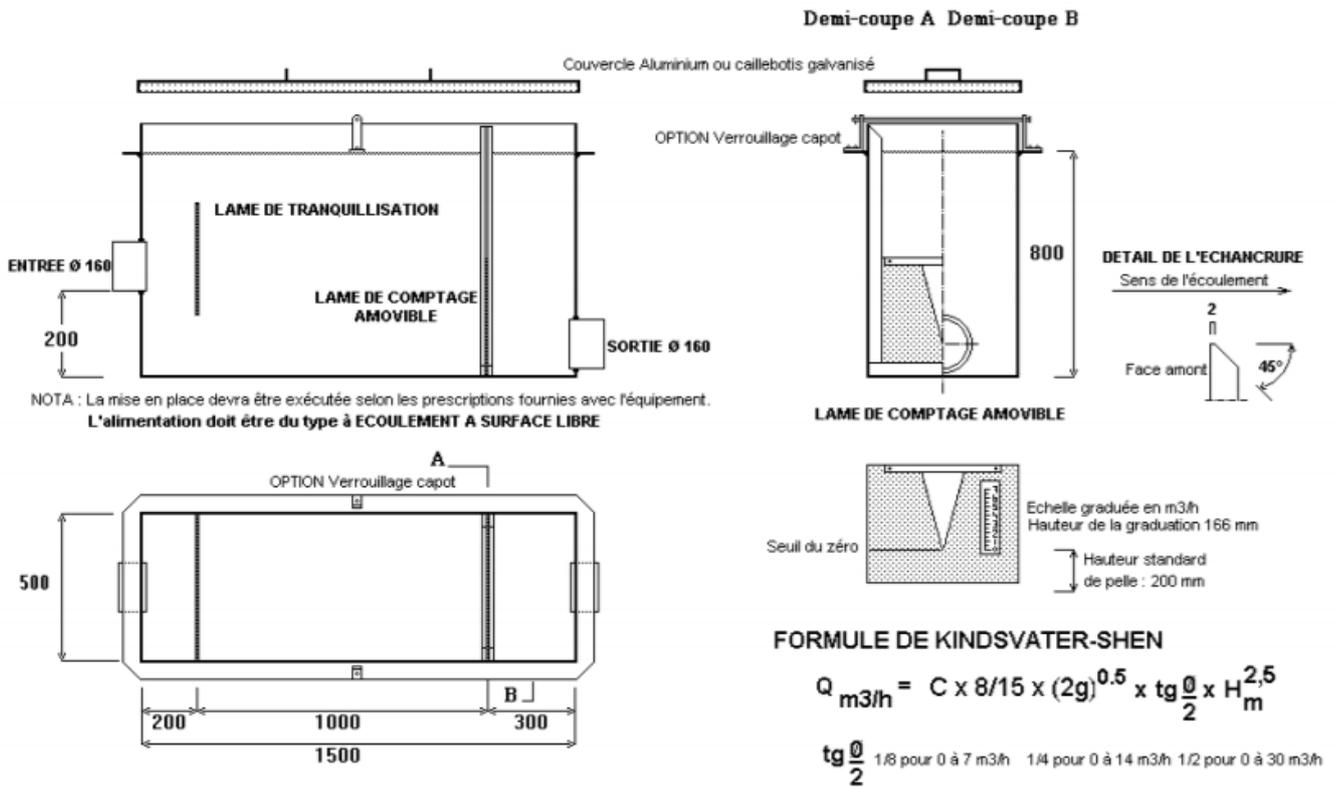
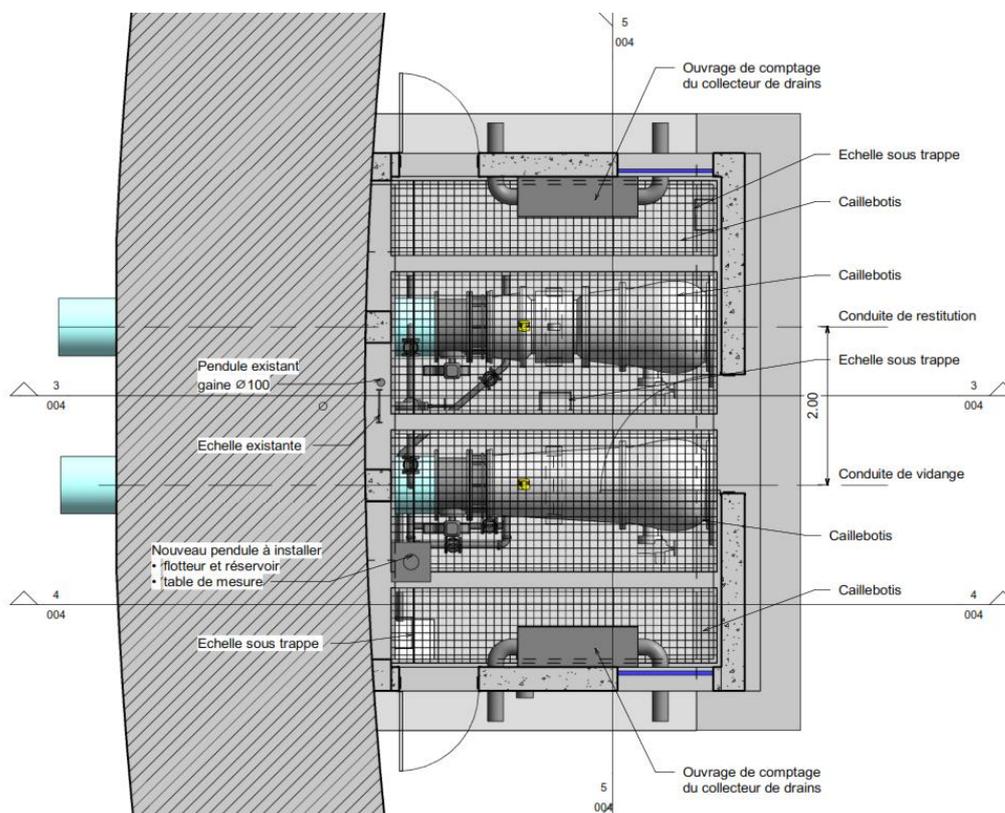
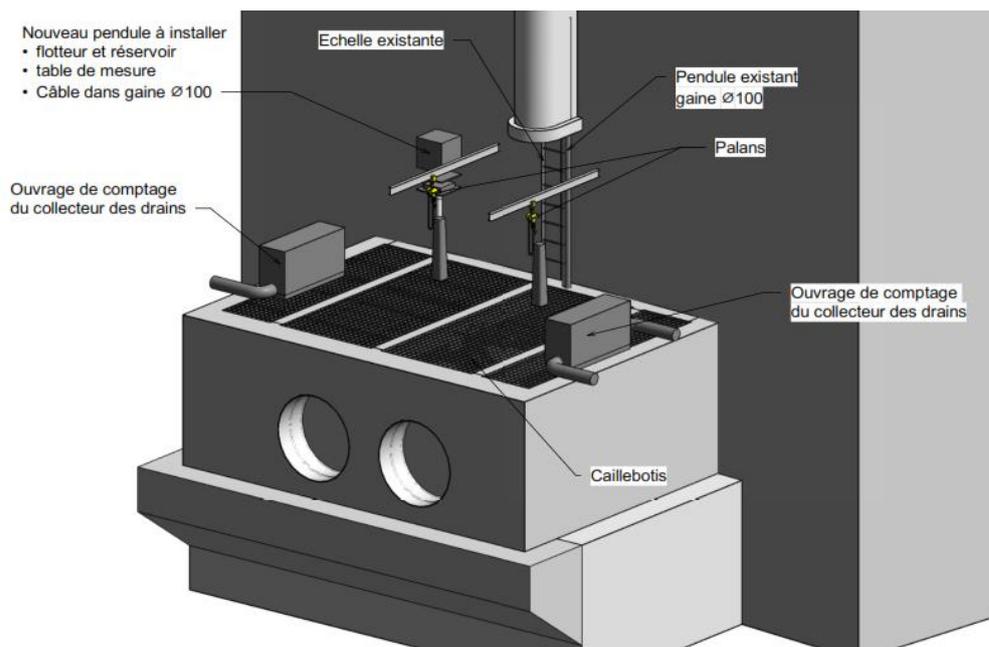


Figure 39 : Plan exemple bac avec déversoir triangulaire à paroi mince (Source : ABT)



Figure 40 : Photo de l'ouvrage de comptage avec échancre de 1/8 (mesure allant de 0 à 14 m3/h) (Source : ABT)

L'implantation des déversoirs triangulaires dans la chambre aval est donnée ci-après :



Figures 41 : Implantation des déversoirs dans la chambre aval (cf. Annexe 3)

Il est à noter que les sorties des bacs traverseront le mur et seront équipées d'un clapet anti-retour afin d'éviter les entrées d'eau. Il en va de même pour l'exutoire de la pompe d'exhaure qui sera placé juste sous le plancher en caillebotis.



2.7 DECONSTRUCTION/RECONSTRUCTION DE LA CHAMBRE AVAL

Il a été fait le choix de déconstruire entièrement la chambre aval pour les raisons suivantes :

- Les travaux de modifications des conduites de restitution et de vidange nécessitent a minima la déconstruction totale du voile face aval et de la dalle de couverture ;
- Les divers ajouts tels qu'une porte et des ouvertures permettant l'équilibre des niveaux d'eau, nécessitent une déconstruction partielle des voiles latéraux.
- Au vu de ces diverses modifications, il est considéré qu'une déconstruction/reconstruction complète du local construit il y a déjà 20 ans est plus avantageuse.

2.7.1 Démolition

Les parties du local déconstruites apparaissent sur la vue 3D ci-dessous. Seul le radier existant et une partie des voiles accolés/parallèles au barrage seront conservés.

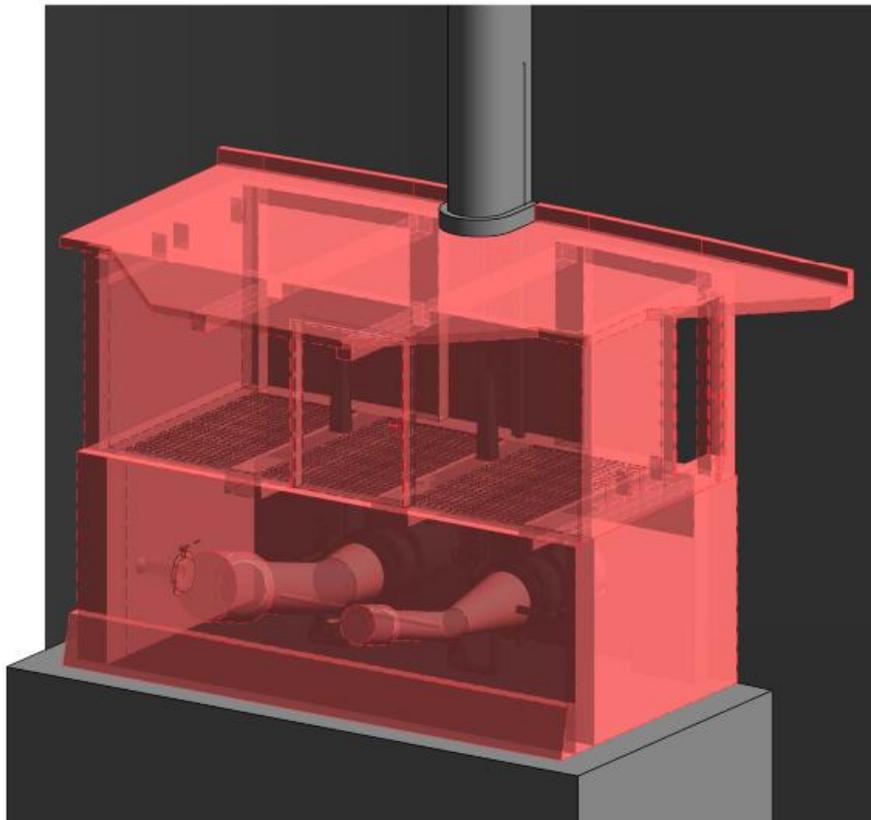


Figure 42 : Vue 3D des éléments du local à déconstruire

Il est proposé de réaliser les travaux de démolition soignée à l'aide de moyens de sciage telle qu'une scie/murale ou à câble avant d'intervenir avec des moyens plus lourds de type BRH afin de préserver la vantellerie. L'intervention au Brise Roche Hydraulique ne se fera que si au préalable des traits de scie ont été réalisés afin de déterminer les zones à déconstruire.

La puissance du matériel sera adaptée au travail à réaliser afin de ne pas risquer d'endommager la vantellerie.



Figure 43 : Moyens de démolition soignée (scie murale et scie à câble diamanté)

Une fois l'ouvrage découpé les pans de murs seront tombés côté bassin de dissipation, les produits de démolitions et de déconstructions seront évacués et revalorisés autant que possible.

Il est recommandé d'effectuer une vérification plomb et amiante avant la déconstruction.

2.7.2 Reconstruction de la chambre aval

2.7.2.1 Génie civil

Une fois la déconstruction effectuée, le terrassement pour la mise en œuvre de l'avancée complémentaire du radier à l'aval sera effectué au plus jusqu'à 1 m de profondeur, afin de la fonder sur le rocher. La fondation de type superficielle fera l'objet d'une justification dans le cadre des études d'exécution et de la mission géotechnique G3.

Une fois la déconstruction et le terrassement réalisé, le repiquage du béton sera effectué sur les surfaces de reprises de bétonnage (notamment sur le radier existant et sur le parement du barrage). Des armatures de coutures seront mises en œuvre entre l'ancien et le nouveau béton par scellement dans l'ancien béton. Un joint hydro-gonflant sera également positionné le long des reprises entre l'existant et l'ouvrage projeté.

Une fois ces travaux préalables réalisés, l'ouvrage pourra être construit. Les éléments sous le niveau des futurs caillebotis seront réalisés dans un premier temps à l'exception du voile face aval (voile de support des vannes annulaires). Ce dernier sera réalisé dans un second temps lorsque les équipements seront posés et que les collerettes des vannes seront prêtes à être scellées dans le voile. Le bétonnage pourra se faire à l'aide d'une benne à béton ou d'une pompe à béton. **La reprise des efforts transmis aux voiles par les collerettes est explicitée dans la note de calculs du génie civil du local fournie en annexe du présent rapport.**

La difficulté de réalisation de ces travaux résidera en la réalisation du voile de la face aval qui selon le mode de gestion du débit réservé (cf.3.2.2) choisi pourra être plus ou moins compliqué.

Le nouveau local présente une forte similarité avec la chambre existante comme on peut le voir sur la Figure 44, mais il présente les améliorations suivantes :

- En rive droite, il y aura une porte et une ouverture avec une grille permettant l'équilibre des pressions hydrostatiques au-delà d'un certain niveau d'eau dans le bassin de dissipation ;
- La dalle de couverture est équipée d'une « casquette » au-dessus des deux portes pour protéger des écoulements d'eau en surverse du barrage lors de l'accès au local technique. La dalle présentera une pente de 1% comme pour le local actuel afin d'évacuer les eaux de ruissellement. La hauteur sous dalle à l'intérieur du local sera constante (de 2.45 m) ;



- La dalle de couverture comporte deux ouvertures avec trappes boulonnées pour permettre l'enlèvement des éléments de vantellerie ;
- La mise en place de treuils monorail (sans commande électrique du fait du caractère inondable de la chambre) (cf. Figure 45)

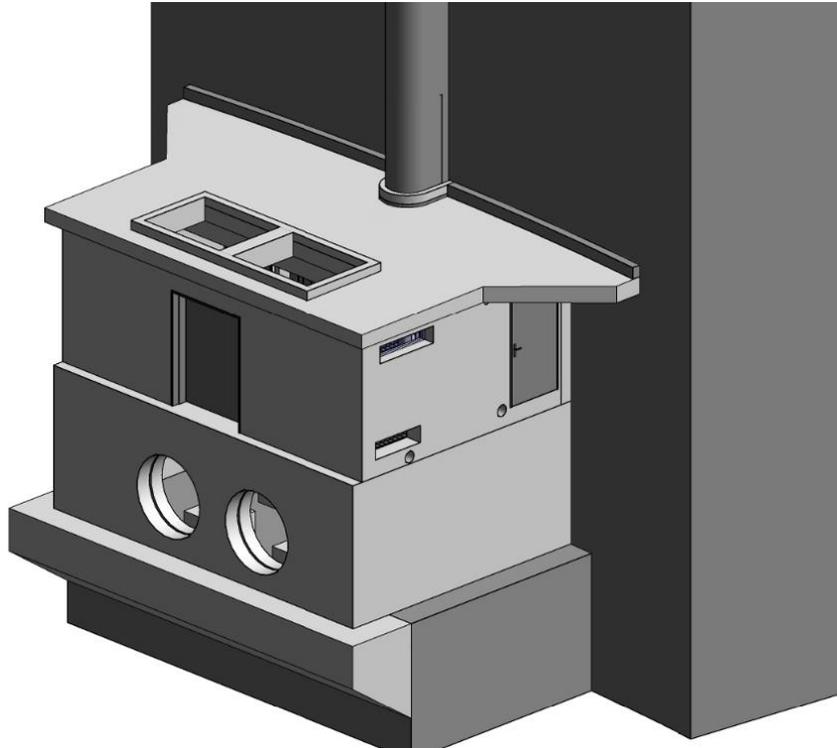


Figure 44 : Vue du local projeté

2.7.2.2 Divers et équipements

2.7.2.2.1 Treuils monorail

Deux treuils monorail seront mis en place sur les poutres axées sur la conduite.

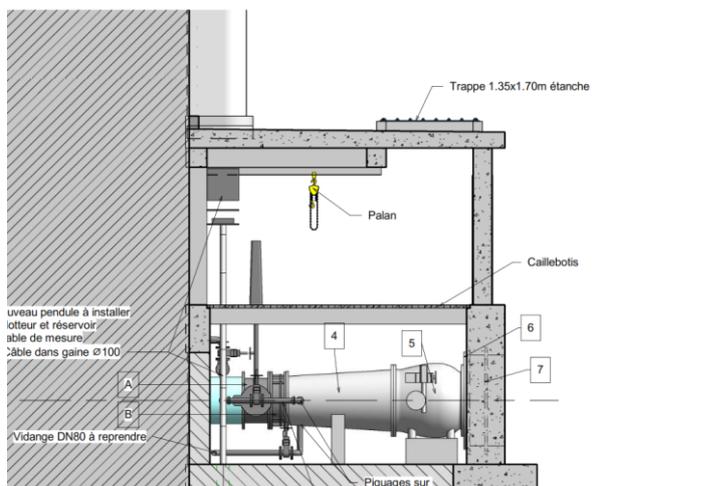


Figure 45 : Treuil monorail



Le principe retenu pour sortir les équipements de la chambre aval est le suivant :

- Utilisation des ouvertures dans la dalle de couverture pour sortir les vannes annulaires à l'aide de la potence de 2 tonnes située sur le couronnement du barrage ;
- Utilisation des treuils de 500 kg fixés le long des poutres axées sur les conduites de vidange et de restitution afin de déplacer les autres éléments (tel que le débitmètre, les brides ou les vannes de garde). Le treuil permettra de les placer sous l'ouverture située dans la dalle de couverture pour permettre leur levage à l'aide de la potence et de les sortir de la chambre.

2.7.2.2.2 Trappe et étanchéité de la dalle de couverture

Au niveau des trappes, afin d'éviter les entrées d'eau dans le local, les ouvertures présenteront un léger débord dans lequel seront noyés des goujons. Des plaques métalliques seront alors boulonnées sur ces goujons. Le détail de cet élément est présenté ci-dessous.

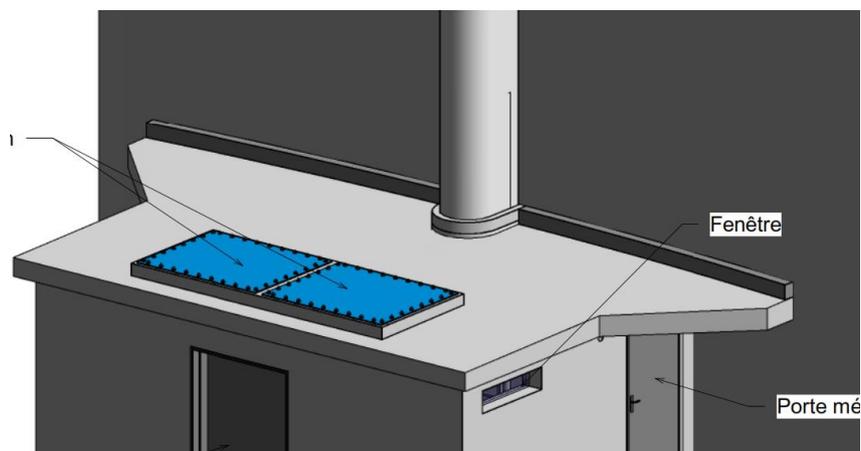


Figure 46 : Détail des ouvertures de la dalle de couverture

En ce qui concerne le raccordement entre l'existant et la dalle de couverture, il sera mis en place une étanchéité à l'aide d'une couvertine ancrée dans l'existant et recouvert d'une étanchéité (de type produits bitumés) descendant au moins de 15 cm sur ce qui pourrait s'apparenter à un acrotère.

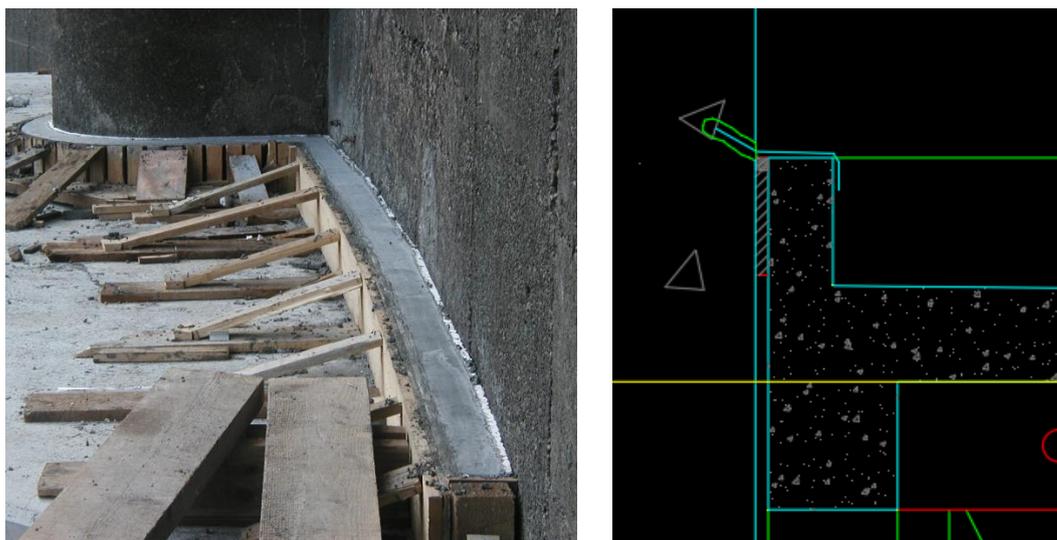


Figure 47 : Détail de l'étanchéité contre le parement du barrage



2.7.2.2.3 Puisard et pompe

Le puisard existant et une pompe permettront de vidanger l'ouvrage notamment lors d'une décrue du plan d'eau. La pompe rejettera l'eau juste sous le plancher en caillebotis.

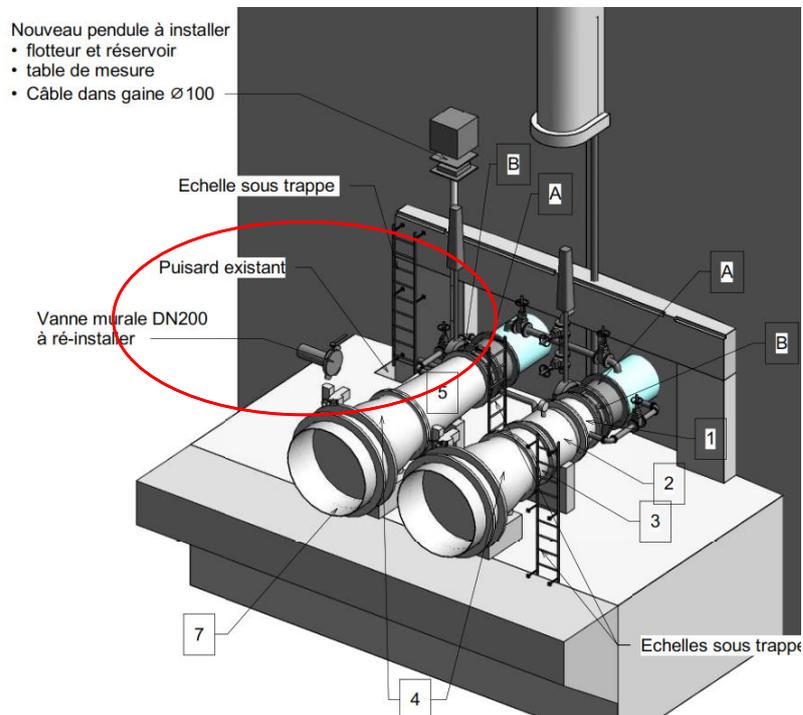


Figure 48 : Détail du puisard

2.7.2.2.4 Caillebotis et échelles

La dalle intermédiaire sera composée d'un plancher en caillebotis démontable pouvant supporter une charge de 250 kg/m². Des échelles sont également prévues pour pouvoir descendre au niveau des vannes et conduites.

Les caillebotis seront équipés de trappes verrouillables permettant :

- L'accès aux échelles ;
- La sortie des équipements par le biais de la potence.



2.8 MODIFICATIONS DES CONDUITES DE RESTITUTION ET DE VIDANGE

Il est rappelé que les modifications apportées aux conduites de restitution et de vidange ont pour but d'augmenter la capacité hydraulique de l'ouvrage de restitution à environ 8 m³/s contre 5,4 m³/s actuellement.

2.8.1 Conduite de restitution

Suite aux travaux des années 2002 / 2003, la tuyauterie et la robinetterie existantes ont été remplacées.

La conduite de restitution en acier de DN 700 aboutit à l'intérieur de la chambre de restitution aval et vient se raccorder à une vanne de garde de type papillon, de même diamètre. La commande de cette vanne est déportée au niveau supérieur situé à la côte 211.50 mNGF.

À l'aval de cette vanne, est disposée une manchette de démontage autobutée, un convergent DN 700 / DN 350, un coude avec un angle d'environ 15°, une longueur droite en DN 350 et une vanne à jet creux de même diamètre.

2.8.1.1 Travaux de dépose des équipements

Dans le cadre du futur aménagement du local de restitution, la prestation de l'entreprise comprendra toutes les sujétions liées aux travaux de dépose et d'évacuation des éléments de tuyauterie et de robinetterie disposés à l'aval de la manchette de démontage autobutée en DN 700.

On notera entre autres, après consignation :

- La vidange, le démontage, le découpage des tuyaux au chalumeau si nécessaire ;
- La manutention des éléments de tuyauterie par les trappes existantes dans la dalle supérieure avec utilisation de tout moyen de manutention nécessaire ;
- Toutes sujétions pour accès difficile et contraintes d'encombrement ;
- Toutes sujétions liées à la présence de canalisations et câbles en service dans l'embarras des travaux ;
- Le transport vers l'extérieur du local ;
- La reprise et la dépose sur un camion de chantier pour évacuation ;
- L'évacuation en décharge agréée.

Il est à noter que les tuyauteries de vidange et d'équilibrage (DN 80 à DN 100) seront à déposer partiellement puis à adapter sur les nouvelles tuyauteries. Le système de manœuvre de la vanne de garde sera également déposé.

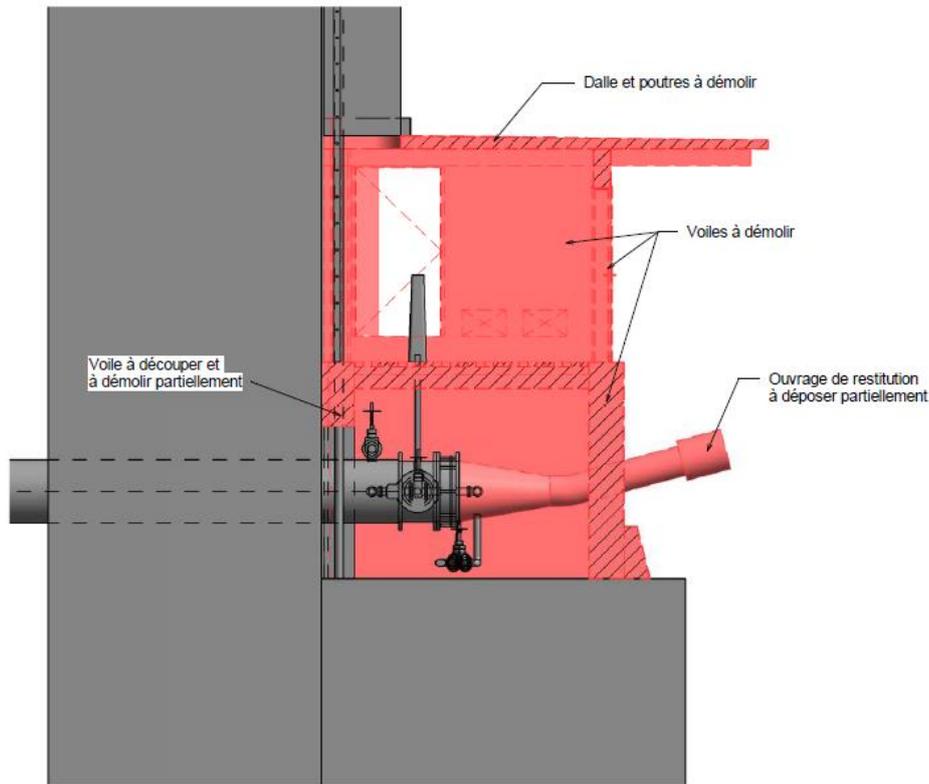


Figure 49 - Éléments à déposer sur la conduite de restitution

2.8.1.2 Descriptif des travaux hydromécaniques

Les travaux de renouvellement des équipements hydromécaniques comprennent :

- La fourniture et la pose d'un divergent à brides en DN 700 / DN 800 avec un angle de 8°. Il sera muni d'un piquage en DN 100 pour l'équilibrage et d'un piquage en DN 80 pour la vidange ;
- La fourniture et la pose d'un débitmètre électromagnétique en DN 800 avec convertisseur déporté en tête de la galerie ;
- La fourniture et la pose d'un divergent à brides en DN 800 / DN 900 avec un angle de 8° ;
- La fourniture et la pose d'une vanne annulaire motorisée en DN 900 avec commande déportée en tête de la galerie ;
- La fourniture et la pose d'une bride d'adaptation entre la vanne et la manchette ;
- La fourniture et la pose d'une manchette à brides en DN 1300 avec collerette d'ancrage à sceller dans le voile aval en béton armé.

Les pièces de tuyauterie seront en acier et revêtues d'une protection par peinture époxy.

Le service d'exploitation du barrage a fait remonter que la maintenance des renvois d'angles des vannes à jets creux dans ce milieu très humide avec parfois des eaux chargées était difficile à assurer. De ce fait, le choix d'une technologie limitant au maximum les renvois d'angle (vanne annulaire) a été retenu.



CHOIX DU DEBITMETRE EN DN800

Le choix final du diamètre du débitmètre a été imposé par la prise en compte de deux contraintes :

- Le respect des débits à faire transiter et les vitesses d'écoulement associées ;
- La position du débitmètre à l'aval immédiat d'une vanne.

Concernant le premier point, il a été recherché le meilleur compromis pour faire passer à la fois le débit minimal (360 L/s) et le débit maximal (4 m³/s). Pour ces deux valeurs, on obtient les résultats de vitesse d'écoulement suivants :

- Pour les 4m³/s :
 - DN700 : vitesse de 10.4 m/s ;
 - DN800 : vitesse de 8 m/s ;
- Pour les 360 L/s :
 - DN700 : vitesse de 0.90 m/s ;
 - DN800 : vitesse de 0.70 m/s.

Il en ressort les conclusions suivantes :

- A faibles débits, les vitesses sont quasi équivalentes ;
- A forts débits, les vitesses dans le DN800 sont davantage acceptables.

Sachant que la précision du débitmètre augmente d'autant plus que les fortes vitesses (> 3m/s) sont moindre, le DN800 représente le meilleur compromis.

En parallèle, et concernant le deuxième point, il a été recherché la position permettant de s'éloigner autant que faire se peut de la vanne de garde papillon tout en restant à une distance raisonnable de la future vanne annulaire.

Par ailleurs, selon les premiers retours des fournisseurs (KROHNE), la présence d'un divergent et/ou convergent en amont du débitmètre permet de s'affranchir des longueurs droites minimales normalement nécessaires.

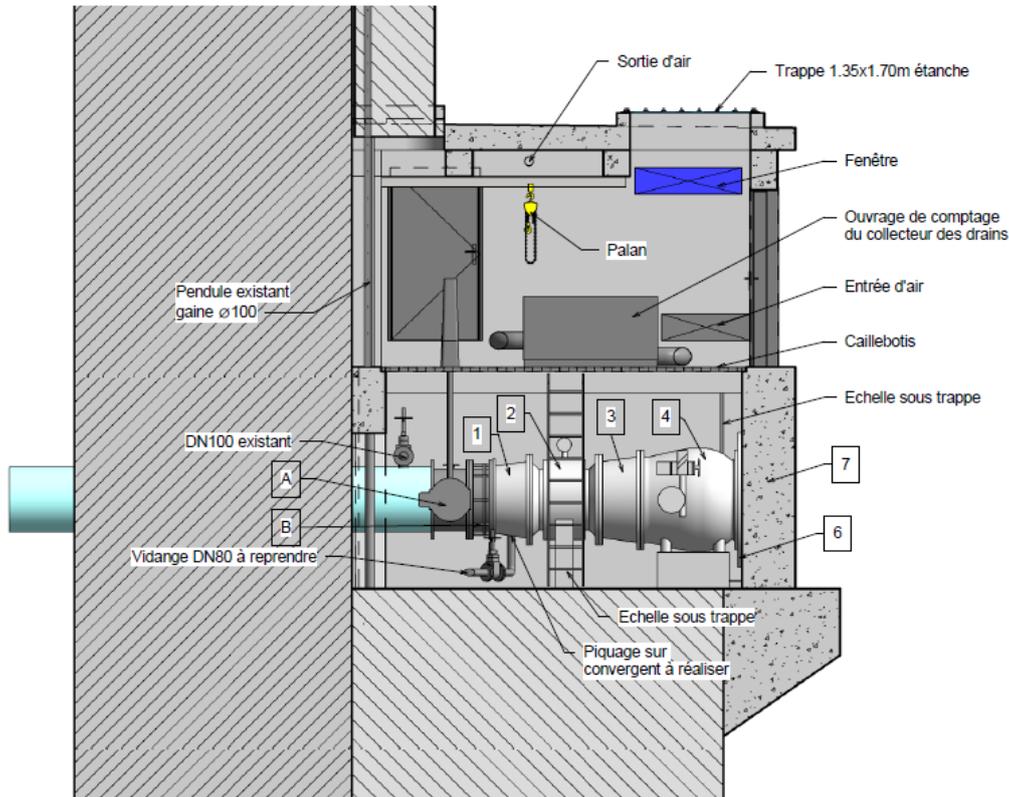


Figure 50 – Nouveaux équipements à installer sur le circuit de restitution

2.8.2 Conduite de vidange

À l'instar de la conduite de restitution, la conduite de vidange a fait l'objet d'un renouvellement dans les années 2002 / 2003.

La conduite de vidange en acier de DN 700 aboutie à l'intérieur de la chambre de restitution aval et vient se raccorder à une vanne de garde de type papillon, de même diamètre. La commande de cette vanne est déportée au niveau supérieur situé à la côte 211.50 mNGF.

À l'aval de cette vanne, est disposée une manchette de démontage autobutée, un convergent DN 700 / DN 600, un coude avec un angle d'environ 15°, une longueur droite en DN 600 et une vanne à jet creux de même diamètre.

2.8.2.1 Travaux de dépose des équipements

Dans le cadre du futur aménagement du local de restitution, la prestation de l'entreprise comprendra toutes les sujétions liées aux travaux de dépose et d'évacuation des éléments de tuyauterie et de robinetterie disposés à l'aval de la manchette de démontage autobuté en DN 700.

On notera entre autres, après consignation :

- La vidange, le démontage, le découpage des tuyaux au chalumeau si nécessaire ;
- La manutention des éléments de tuyauterie par les trappes existantes dans la dalle supérieure avec utilisation de tout moyen de manutention nécessaire ;
- Toutes sujétions pour accès difficile et contraintes d'encombrement ;
- Toutes sujétions liées à la présence de canalisations et câbles en service dans l'embarras des travaux ;



- Le transport vers l'extérieur du local ;
- La reprise et la dépose sur un camion de chantier pour évacuation ;
- L'évacuation en décharge agréée.

Il est à noter que les tuyauteries de vidange et d'équilibrage (DN 80 à DN 100) seront à déposer partiellement puis à adapter sur les nouvelles tuyauteries. Le système de manœuvre de la vanne de garde sera également déposé.

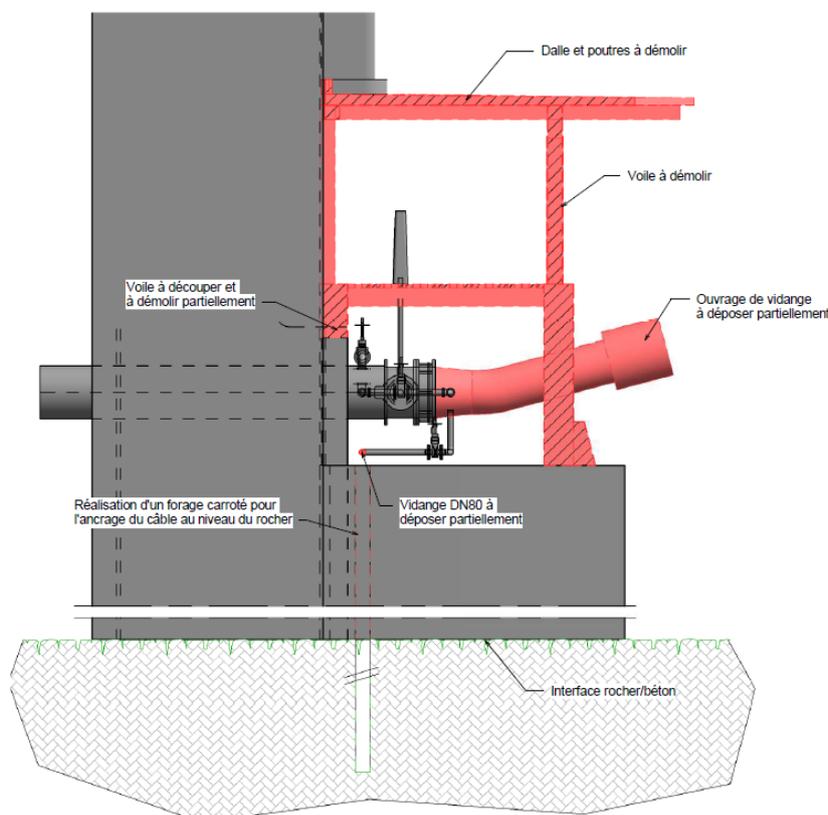


Figure 51 - Éléments à déposer sur la conduite de vidange

2.8.2.2 Descriptif des travaux hydromécaniques

Les travaux de renouvellement des équipements hydromécaniques comprennent :

- La fourniture et la pose d'une longueur droite à brides en DN 700. Elle sera munie d'un piquage en DN 100 pour l'équilibrage et d'un piquage en DN 80 pour la vidange ;
- La fourniture et la pose d'un divergent à brides en DN 700 / DN 900 avec un angle de 8° ;
- La fourniture et la pose d'une vanne annulaire motorisée en DN 900 avec commande déportée en tête de la galerie ;
- La fourniture et la pose d'une bride d'adaptation entre la vanne et la manchette ;
- La fourniture et la pose d'une manchette à brides en DN 1300 avec collerette d'ancrage à sceller dans le voile aval en béton armé.

Les pièces de tuyauterie seront en acier et revêtues d'une protection par peinture époxy.

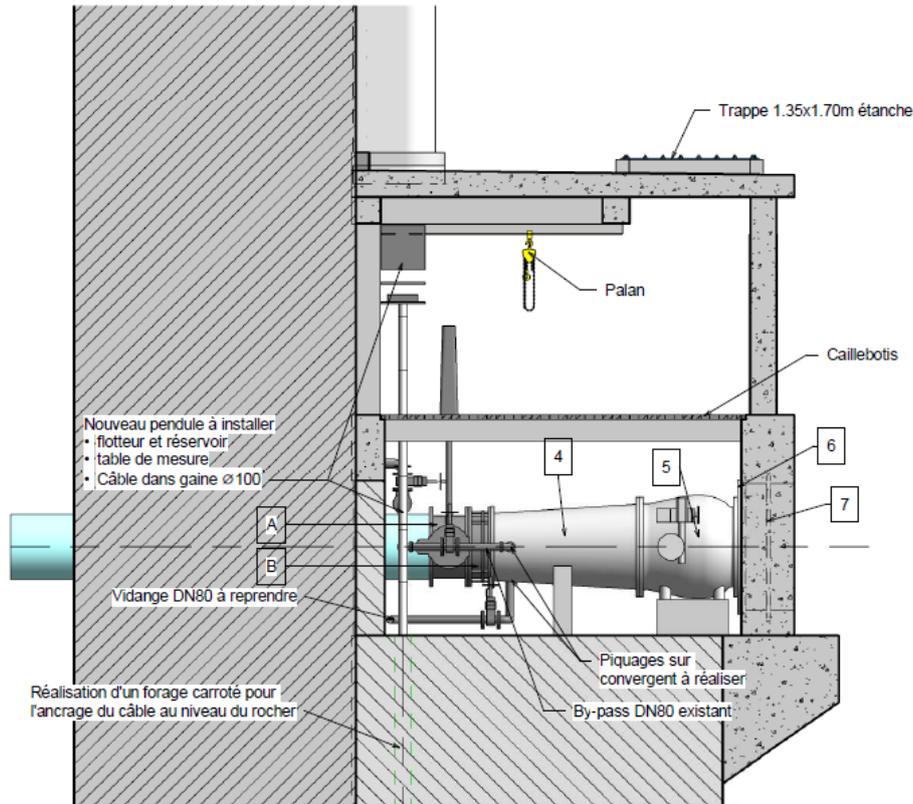


Figure 52 - Équipements à installer sur le circuit de vidange

2.9 DISPOSITIFS DE CONTROLE COMMANDE

2.9.1 Bilan de puissance

L'ajout de nouveaux équipements induit une augmentation de la puissance électrique qui sera consommée. Toutefois, au regard des éléments transmis par les fabricants de ces équipements, la puissance supplémentaire installée devrait être inférieure à 1 kW.

L'alimentation actuelle est suffisamment dimensionnée pour recevoir cette puissance supplémentaire.

2.9.2 Alimentation électrique du coffret

Le coffret électrique (situé à l'entrée de la galerie en RG) destiné à l'alimentation des nouveaux équipements du local de restitution sera protégé par un disjoncteur qui sera installé dans le coffret de distribution électrique existant.

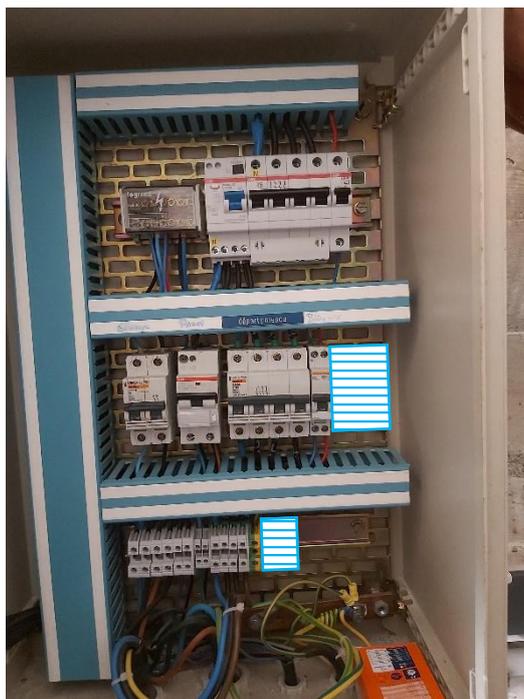


Figure 53 - Implantation du disjoncteur de protection du coffret de restitution

Un bornier sera également ajouté dans ce coffret pour raccorder le câble d'alimentation.

2.9.3 Composition du coffret

Le nouveau coffret, appelé « coffret de restitution » sera installé en tête de la galerie à proximité du coffret de distribution.

Il assurera l'alimentation électrique des deux vannes annulaires et du débitmètre de restitution ainsi que le rapatriement de leurs informations et de leur commande.

Il se composera à l'intérieur de :

- Un interrupteur d'arrivée tétrapolaire ;
- Un ensemble disjoncteur moteur et contacteurs pour chaque vanne annulaire ;
- Un disjoncteur de protection pour le débitmètre ;
- Un disjoncteur de protection pour le récepteur radio de la télécommande industrielle ;
- Un disjoncteur de protection pour la commande ;
- Relayage éventuel ;
- Borniers de puissance et de commande ;

En face avant, il sera disposé :

- Un voyant de présence tension ;
- Un bouton d'arrêt d'urgence de type coup de poing ;
- Trois boutons poussoirs lumineux par vanne annulaire répartis comme suit :
 - De couleur verte pour la manœuvre d' « ouverture ». Lorsque le contact de fin de course « ouvert » est atteint le voyant s'allume ;



- De couleur rouge pour l' « arrêt » de manœuvre. Lorsque la vanne est en défaut le voyant s'allume ;
- De couleur bleue pour la manœuvre de « fermeture ». Lorsque le contact de fin de course « fermé » est atteint le voyant s'allume.

Nota : Les voyants « ouverture » et « fermeture » clignoteront pendant la phase associée du mouvement de la vanne.

Les câbles chemineront entre ce coffret et les équipements installés à l'intérieur du local de restitution en empruntant la galerie transversale puis la cheminée d'accès. Ils seront disposés à l'intérieur de chemins de câbles.

Des boîtes de jonction pourront être employées entre les équipements et le coffret de contrôle commande. Elles devront être installées à l'extrémité supérieure de la cheminée d'accès, au droit de la galerie transversale.

2.9.4 Radiocommande industrielle

Il sera fourni une radiocommande industrielle pour permettre la manœuvre locale des vannes depuis le local de restitution.

Elle se composera d'un émetteur (la radiocommande) et d'un récepteur radio qui délivrera les ordres de manœuvre au coffret de contrôle commande des vannes.

L'ensemble sera livré avec un chargeur de batterie pour la radiocommande, une antenne extérieure à la galerie pour assurer un usage depuis le local de restitution ainsi que d'un klaxon qui sera installé au droit de la cheminée d'accès aval pour prévenir d'une manœuvre distante des vannes.

La radiocommande disposera de :

- Un commutateur à deux positions « local / radio » permettant de sécuriser le pilotage des vannes depuis la radiocommande. En position « radio », il ne sera alors plus possible de passer des ordres depuis les boutons du coffret de restitution. La radiocommande devenant prioritaire ;
- Deux boutons poussoirs non auto-maintenus pour l'ouverture et la fermeture de chaque vanne annulaire.



Figure 54 – Radiocommande industrielle et son récepteur

Note : La portée moyenne de ce matériel est de 100 m en milieu industriel à 300 m en espace dégagé.



2.9.5 Dispositifs déportés

Les dispositifs déportés des équipements suivants seront installés à proximité du coffret de contrôle commande des vannes de restitution et de vidange :

- Commande déportée de l'actionneur électrique de chaque vanne ;
- Convertisseur de mesure du débitmètre électromagnétique du circuit de restitution ;
- Récepteur radio de la télécommande industrielle.

Ces dispositifs échangeront des informations avec le coffret de contrôle commande via des liaisons filaires.



3 PRESCRIPTIONS PARTICULIÈRES APPLICABLES AUX TRAVAUX

3.1 ACCES POUR TRAVAUX ET INSTALLATIONS DE CHANTIER

La desserte terrestre s'effectue par la rive gauche, le barrage des Cambous est accessible depuis la N106 comme indiqué ci-dessous.



Figure 55 : Localisation du barrage des Cambous

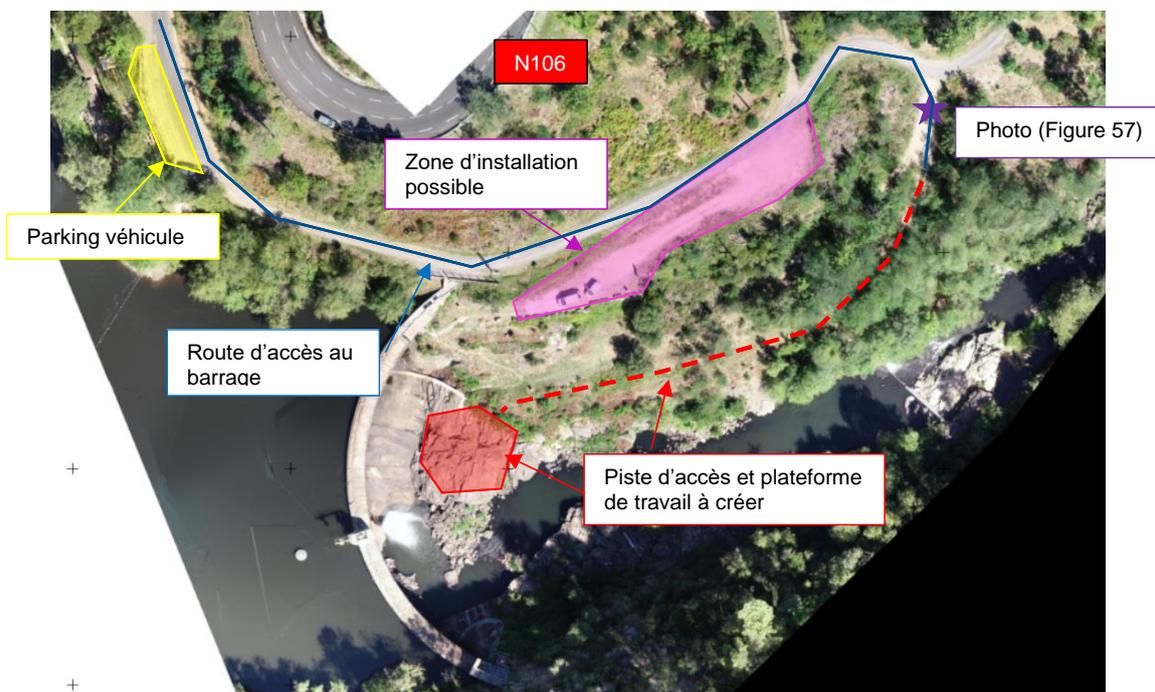


Figure 56 : Accès au barrage via la N106, orthophoto 2021



La partie de la route en enrobé présente un état suffisamment correct pour faire passer des engins. Cependant à partir du point ★, représenté sur la Figure 56, le chemin se transforme en piste recouverte de végétation sur laquelle se situe un embranchement.



Figure 57: Début de la piste d'accès

L'embranchement présenté sur la figure ci-dessus permet de suivre deux pistes. La première (à droite sur la Figure 57) n'est pas praticable car la piste est étroite du fait de rocher affleurant, et présente un talus avec une pente importante. Elle comporte de plus une conduite AEP qui traverse le barrage et se situe à fleur de la surface comme le montre la figure suivante.



Figure 58: Piste à droite de l'embranchement (accès étroit)



Figure 59: Conduite AEP à fleur de la surface sur l'embranchement à droite

La piste à gauche de l'embranchement sur la Figure 57 permet d'accéder à une piste présentant beaucoup de végétation. C'est cette dernière qui a été utilisée pour les travaux de 2002/2003. Cette piste sera donc praticable par les divers engins de chantier une fois celle-ci débroussaillée, décapée et revêtue d'un géotextile et d'une couche de GNT sur une largeur de 3m.

La piste d'accès et la plateforme de travail qui avaient été mises en œuvre lors des travaux de 2002/2003 sont présentées ci-dessous.



Figure 60: Piste d'accès lors des travaux de 2002/2003

En bout de cette piste une plateforme de travail sera mise en œuvre afin d'y installer la grue. La capacité portante de la plateforme sera adaptée aux dimensions de la grue et sera testée à l'aide d'essais à la plaque. La plateforme de travail des travaux de 2002/2003 est présentée ci-dessous.



Figure 61: Plateforme de travail des travaux de 2002/2003

À la fin des travaux, la plateforme de travail et les accès seront remis en état (si les travaux venaient à améliorer les accès, ces améliorations pourront être conservées avec l'accord préalable du maître d'ouvrage).

Le plan suivant présente la piste d'accès et la plateforme de travail qui seront mises en œuvre.



3.2 GESTION DES VENUES D'EAU

La principale contrainte des travaux réside dans la gestion des venues d'eau vis-à-vis de la surverse du barrage et dans la mise à sec de la zone de travaux.

Pour cela plusieurs dispositions sont envisagées :

- Abaissement partiel du plan d'eau afin de limiter les surverses et de disposer d'une marge de manœuvre dans la gestion du plan d'eau selon les débits entrants et la gestion des crues (alerte, mise en sécurité du chantier,...) ;
- Mise en place d'un dispositif de gestion de débit réservé et de régulation du plan d'eau ;
- Mise en place d'un batardeau aval afin de pouvoir mettre à sec la zone de travaux notamment pour l'exécution et la protection de la fosse et du local technique ;

3.2.1 Abaissement partiel du plan d'eau

Un abaissement partiel du plan d'eau est nécessaire afin de ne pas avoir de surverse sur la zone des travaux. Selon les modalités de gestion du plan d'eau, il est nécessaire de prévoir une marge de manœuvre afin de pouvoir anticiper toute action sur le plan d'eau en fonction des variations sur les débits entrants et de la montée du plan d'eau générée ou toute action vis-à-vis de la protection du chantier en cas de crue.

Afin de tenir compte des besoins d'abaissement du plan d'eau aval pour les travaux de réalisation de la chambre de restitution des débits du barrage de Sainte, il est proposé d'abaisser le plan d'eau à la cote 224 mNGF préalablement au démarrage des travaux, afin de bénéficier d'environ 400 000 m³ de stockage, tout en conservant une charge suffisante pour la gestion des débits courants et la régulation du plan d'eau en phase travaux.

Un abaissement de 3 m par rapport au seuil déversant permettrait donc de stocker environ 400 000 m³. Les crues du barrage de Sainte Cécile (s'étalant de 1976 à 2002) ont été étudiées afin de déterminer le temps de remplissage de la retenue des Cambous sur les mois d'avril à septembre.

Les débits sortants de Sainte Cécile ont été considérés comme étant les débits entrants au barrage des Cambous. Ces débits ont permis d'estimer le volume d'eau entrant $V_{\text{entrant CAM}}$ dans la retenue des Cambous heure par heure. Dans le même temps, la capacité du dispositif de régulation du plan d'eau (4m³/h) permet également d'évacuer une partie de ces débits : $V_{\text{sortant CAM}}$. La différence entre ces deux valeurs ($V_{\text{entrant CAM}} - V_{\text{sortant CAM}}$) permet de déterminer le volume stocké par le barrage des Cambous. Le cumul des volumes accumulés est ensuite tracé en fonction du temps afin de déterminer à partir de quel laps de temps la réserve de 400 000 m³ est remplie. Ce laps de temps détermine la marge de manœuvre laissée à l'entreprise pour mettre en sécurité le chantier.

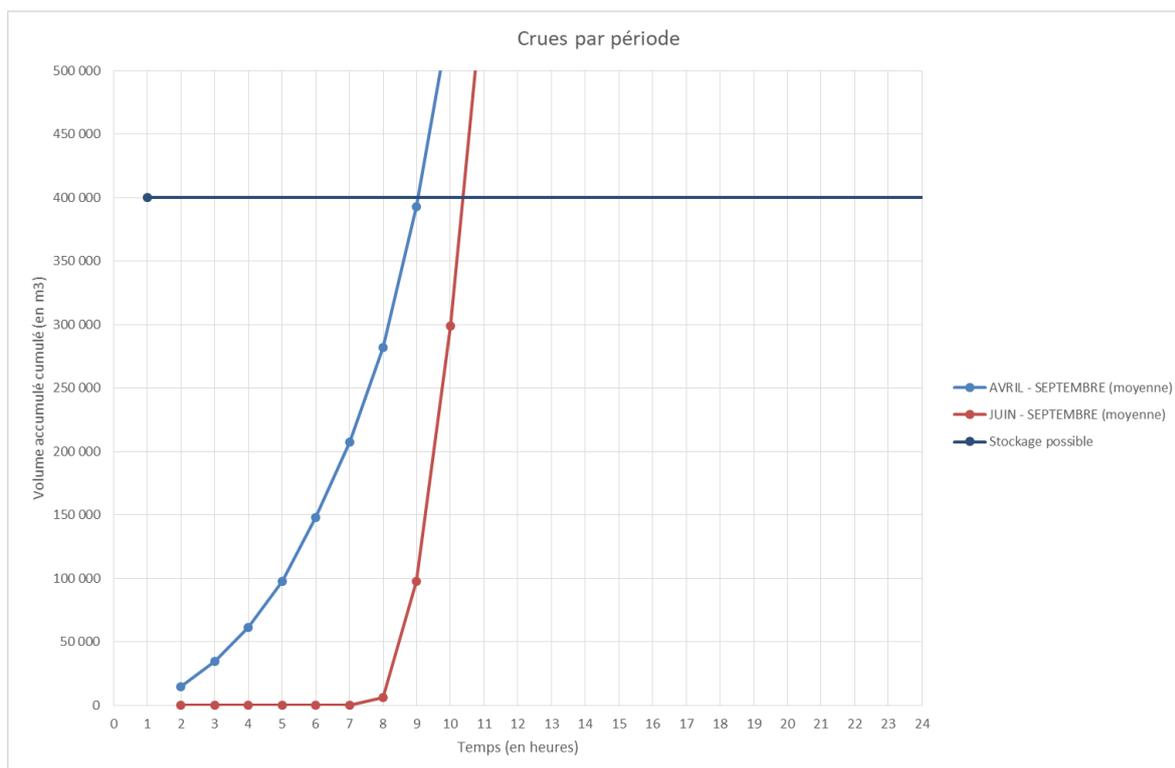


Figure 63: Analyse des crues sur les périodes Avril-Septembre et Juin-Septembre (moyenne des débits)

Il apparaît que si les travaux sont effectués d'avril à septembre, l'entreprise disposera en moyenne de 9h pour évacuer le chantier et replier le matériel dans le cas de l'arrivée d'une crue. De juin à septembre le délai s'allonge et monte à 10h en moyenne.

Une analyse au cas par cas de ces crues donne les résultats affinés suivants :

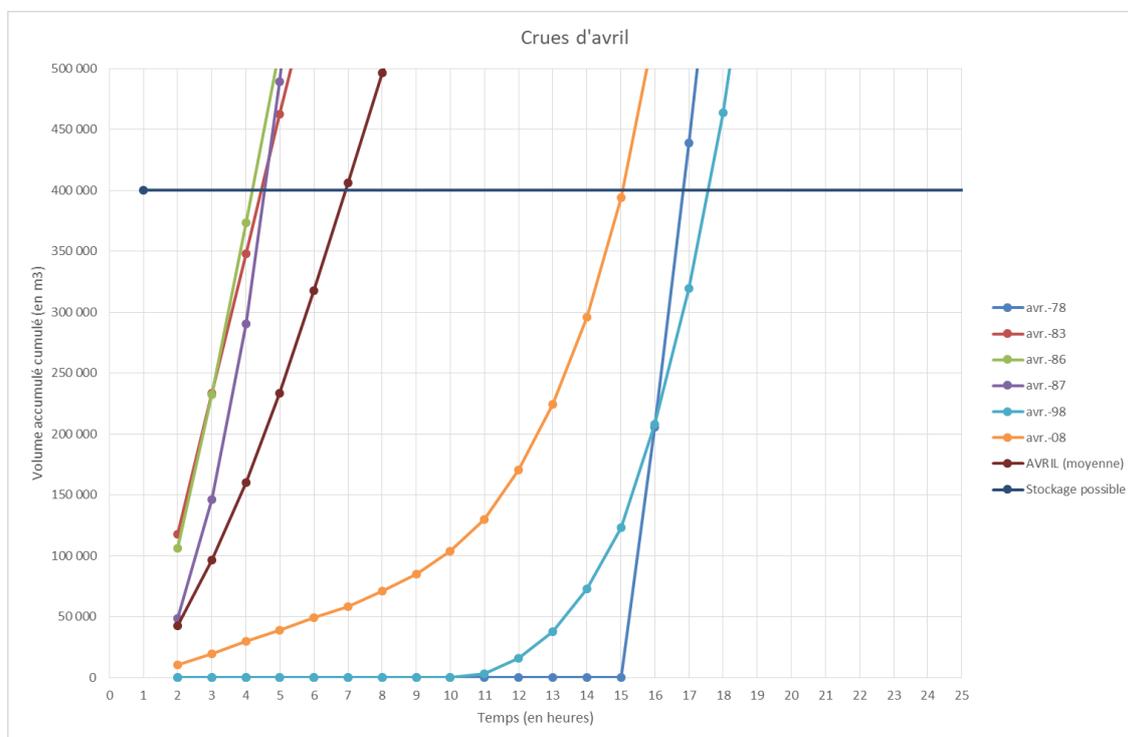


Figure 64: Analyse des crues du mois d'avril

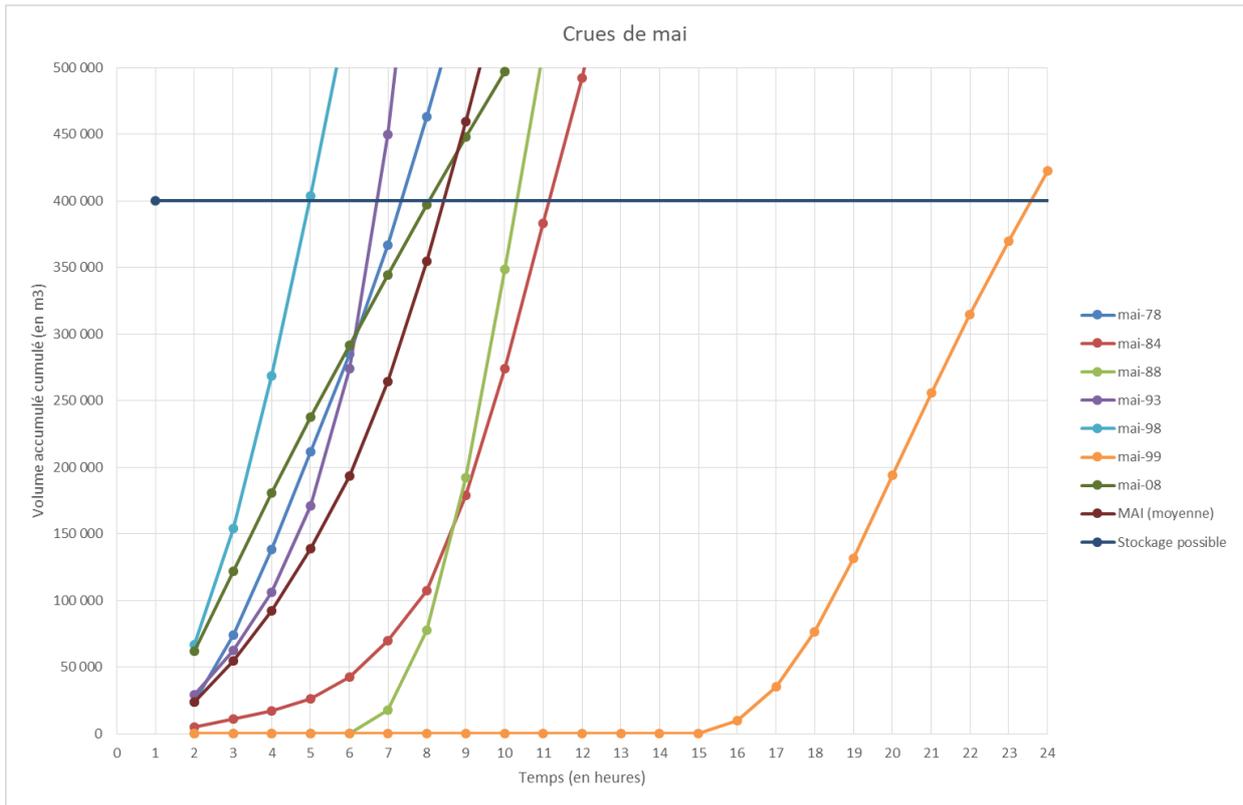


Figure 65: Analyse des crues du mois de mai

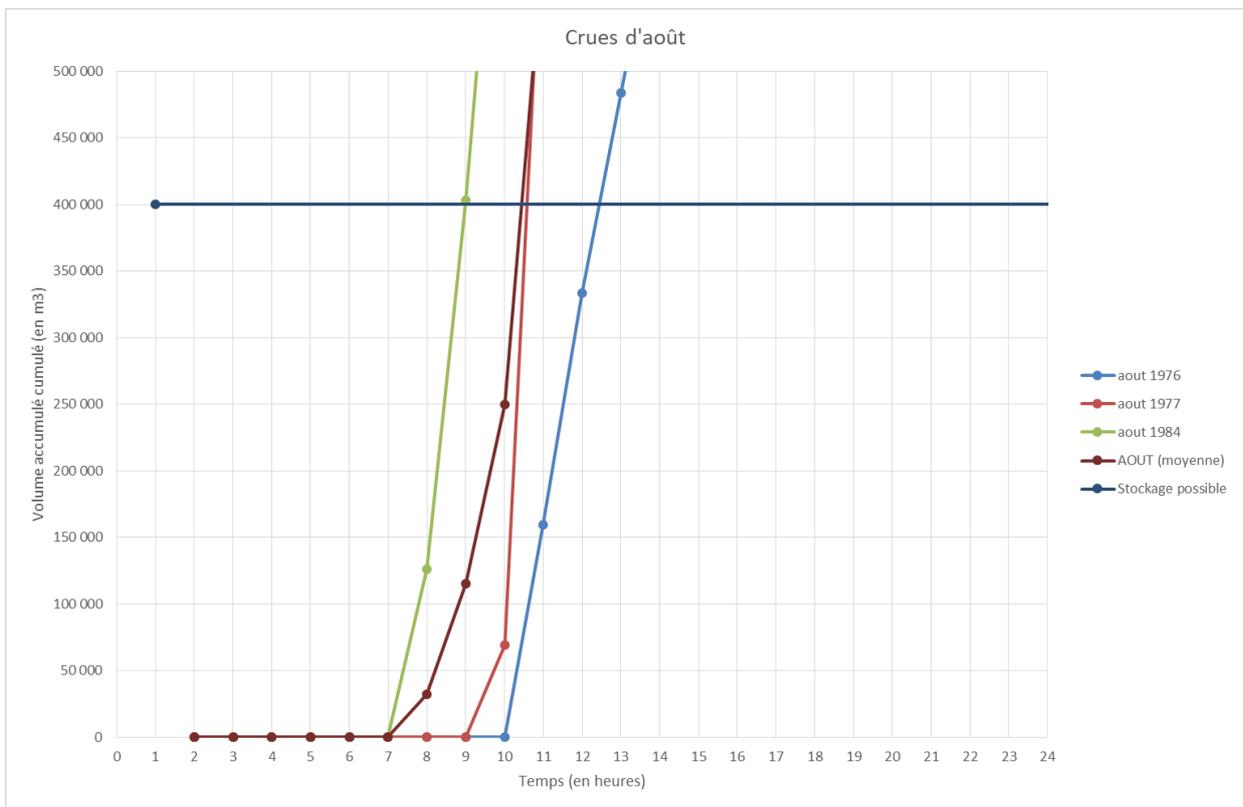


Figure 66: Analyse des crues du mois d'août

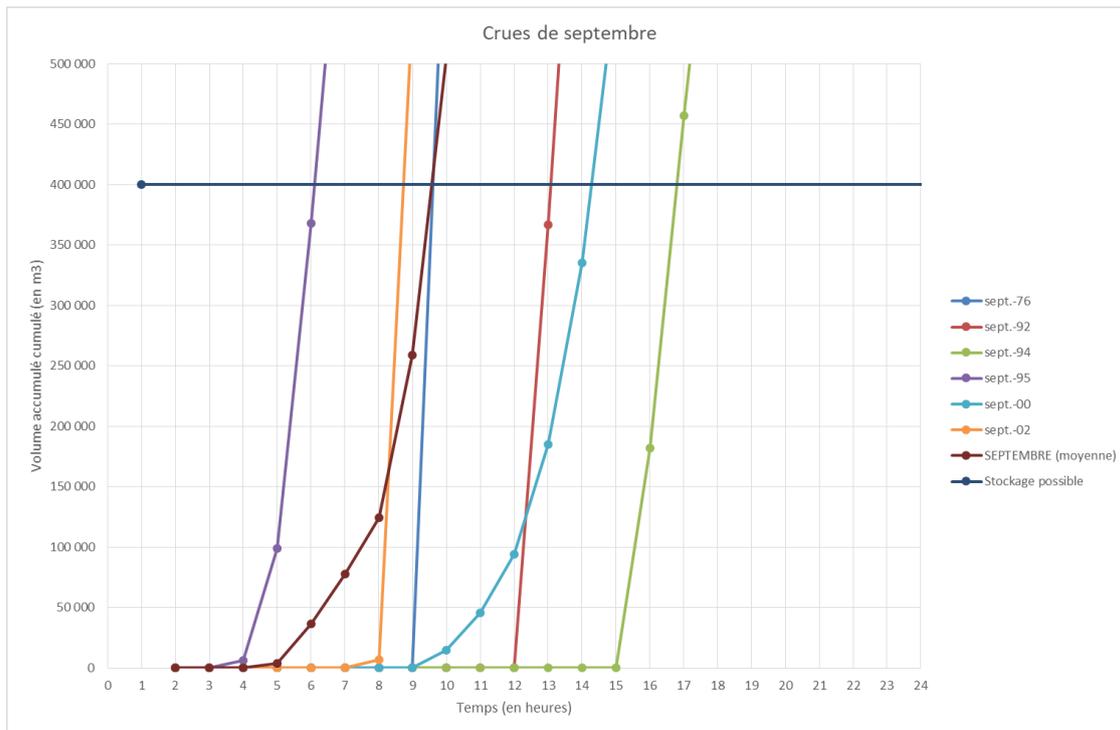


Figure 67 : Analyse des crues du mois de septembre

Tableau 5 : Temps de remplissage de la retenue en cas de crue (analyse par mois)

Temps de remplissage	Avril	Mai	Août	Septembre
Temps mini	4h	5h	9h	6h
Temps maxi	17.5h	23.5h	12.5h	16.5h
Temps moyen	7.5h	8.5h	10.5h	9.5h

En parallèle, une analyse statistique du risque de surverse a été menée en se basant sur l'analyse des crues saisonnière au droit du barrage de Sainte Cécile. Sur la période du mois de juin à juillet, période privilégiée pour les travaux critique sur le barrage des Cambous, les cumuls pluviométriques LM (i.e. LMx = cumul pluviométrique sur x heures) pour les périodes de retours allant de 0.8 à 112 ans ont été appliqués au bassin versant des Cambous (124 km²). Il en ressort alors les volumes de crues associés suivants (les cases vertes matérialisent les volumes inférieurs à 400 000m³ correspondant à la capacité de stockage pendant l'abaissement du plan d'eau) :

Tableau 6 : Volume des crues saisonnières (juin-juillet) au droit du barrage des Cambous (en m³)

T(an)	QP(m3/s)	LM1	LM2	LM3	LM4	LM6	LM12	LM24	LM48	LM72
112	164	601 276	1 174 032	1 698 056	2 173 844	2 975 504	4 662 524	6 473 668	8 207 932	9 044 312
56	121	448 384	878 540	1 277 200	1 641 512	2 267 836	3 618 444	5 159 888	6 698 976	7 515 516
20	73	272 800	536 548	786 160	1 018 908	1 435 052	2 397 044	3 606 788	4 914 988	5 639 024
10	51	188 976	372 744	548 452	714 736	1 018 784	1 751 996	2 745 980	3 888 020	4 512 112
8	46	171 120	338 024	498 108	649 760	928 512	1 610 636	2 549 564	3 644 112	4 239 436
7	42	155 000	306 404	451 856	590 364	846 176	1 478 204	2 361 332	3 402 436	3 964 280
6	37	139 996	276 892	408 704	534 688	767 932	1 350 236	2 177 936	3 162 620	3 689 372
5	34	126 108	249 488	368 652	482 484	694 648	1 229 212	1 999 376	2 924 044	3 414 340
4	30	112 964	223 820	330 956	433 752	625 580	1 114 016	1 824 784	2 681 748	3 135 340
3,3	27	100 688	199 640	295 368	387 376	560 232	1 002 664	1 654 036	2 443 916	2 856 464
2,8	24	89 156	176 576	261 516	343 356	497 488	894 908	1 485 520	2 203 604	2 574 984
2,3	21	78 120	154 876	229 524	301 568	437 596	791 120	1 319 732	1 965 152	2 295 116
2,0	18	67 704	134 168	199 020	261 640	380 308	689 812	1 156 424	1 727 692	2 021 200
1,6	15	57 784	114 700	170 004	223 696	325 748	593 712	999 192	1 496 928	1 754 104
1,4	13	48 608	96 472	143 096	188 480	274 784	502 820	850 392	1 278 936	1 499 408
1,1	11	40 052	79 484	117 924	155 372	227 044	417 136	709 156	1 069 376	1 253 268
1,0	9	31 992	63 488	94 364	124 372	182 032	335 916	574 492	866 140	1 009 980
0,8	6	23 808	47 368	70 308	92 752	135 904	251 472	431 024	646 908	738 296

Ce tableau met en évidence que le risque de surverse est quasi avéré durant les travaux.



3.2.2 Dispositif de régulation du plan d'eau et de gestion du débit réservé

Deux solutions sont proposées afin de réguler le plan d'eau sur la gamme des débits courants en fonction de la période de travaux envisagée, et restituer le débit réservé au Gardon :

- La première est l'utilisation des dispositifs de restitution et de vidange actuels ou modernisés selon un phasage des travaux ;
- La deuxième est la mise en place d'un siphon provisoire.

3.2.2.1 Définition du dispositif

3.2.2.1.1 Analyse des débits courants

Nous rappelons les débits moyens mensuels ci-dessous :

Tableau 7 : Tableau des débits moyens mensuels (1987 à 2011) apportés par le barrage de Sainte Cécile d'Andorge à la retenue des Cambous (Source : Etude BRLi - Stratégie de gestion de la ressource en eau face au changement climatique : Schéma Départemental du Gard "Eau et Climat 3.0)

Débit (m ³ /s)	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel
Q moy	5,82	3,88	2,69	2,51	2,51	1,22	0,53	0,29	0,53	2,48	6,17	5,45	2,83
Q 5 hum	9,34	5,47	4,33	3,48	4,40	1,43	0,61	0,35	0,65	3,73	8,67	10,14	3,54
Q 10 hum	11,24	7,97	5,96	4,68	5,84	2,48	1,07	0,45	1,15	6,58	13,43	14,03	4,25

76

Il ressort qu'une capacité de régulation du plan d'eau à hauteur de 4m³/s permettrait de dégager une période de travaux satisfaisante, de l'ordre de 4 à 6 mois selon les années.

3.2.2.1.2 Phasage des travaux et utilisation des conduites de restitution et de vidange

Dans un premier temps, il peut être envisagé de restituer le débit entrant par le biais de la conduite de vidange actuelle puis, dans un second temps, par la conduite de restitution modernisée afin de bénéficier en continue d'une capacité de l'ordre de 3,7m³/s sous la cote 224 mNGF. Pour ce faire, le phasage travaux suivant a été imaginé (après réalisation des pistes de chantier) :

- Étape 1 : Usinage et préparation des éléments de la conduite de vidange à prolonger ;
- Étape 2 : Interruption du débit réservé temporairement afin de mettre en œuvre la conduite de vidange prolongée ;



Figure 68: Solution de prolongement de la conduite de vidange pour gestion du débit réservé

- Étape 3 : Réalisation d'un merlon pour mettre à sec la zone d'emprise des travaux puis pompage et évacuation de l'eau dans la zone batardée ;
- Étape 4 : Réalisation des travaux de démolition/reconstruction de la chambre et changement des équipements de vantellerie sur la conduite de restitution ;
- Étape 5 : Interruption temporaire du débit réservé, changement des équipements sur la conduite de vidange et réalisation du génie civil de la chambre.

Cette solution présente un coût intéressant mais les inconvénients suivants :

- Phasage et méthode complexes ;
- Utilisation de la vanne de vidange de fond qui prélèvera une eau potentiellement plus chargée en sédiments ;
- Interruption ponctuelle du débit réservé.

3.2.2.1.3 Mise en place d'un siphon

La mise en place d'un siphon peut être envisagée en rive droite du barrage comme cela avait été réalisé lors des travaux de 2002-2003.



Figure 69: Siphon lors des travaux de 2002/2003

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Le siphon permet de franchir l'ouvrage et la zone de travaux qui sépare la retenue amont de l'aval du barrage. Le dispositif proposé est similaire à celui qui a été utilisé lors des travaux de 2002 /2003.

Il comprend un ensemble de tuyauterie composé de tronçons droits et de coudes, à son extrémité amont (coté aspiration) un clapet anti-retour avec crépine et à son extrémité aval une vanne d'isolement de type papillon. Le sommet du siphon est équipé d'un piquage et d'une vanne pour l'alimentation du siphon.

L'amorçage du siphon s'effectue par le piquage de remplissage prévu à cet effet à l'aide d'une pompe, la vanne à l'aval du siphon étant fermée. Une fois le remplissage achevé, la vanne de piquage est fermée puis on procède à l'ouverture de la vanne de refoulement.

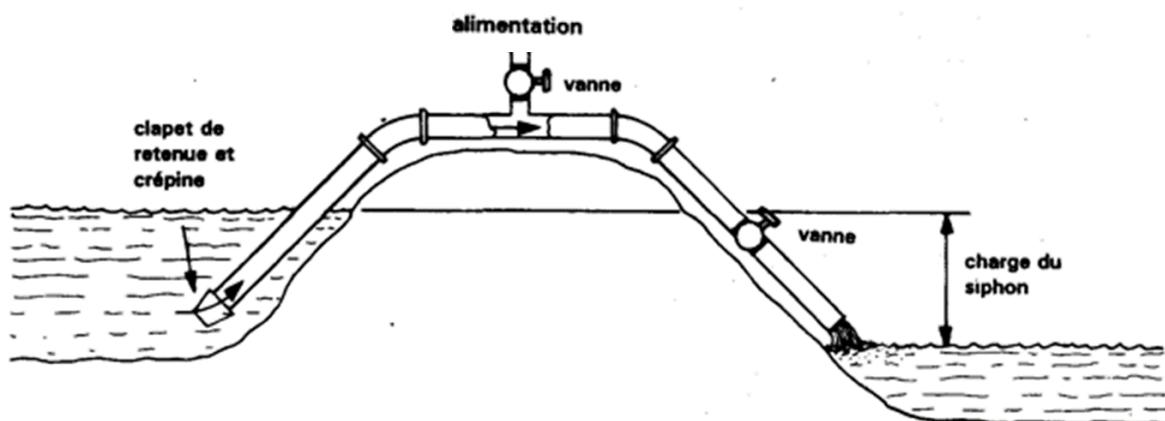


Figure 70: Illustration du principe de fonctionnement d'un siphon (source : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO))



DIMENSIONNEMENT

Durant la phase des travaux, le plan d'eau de la retenue amont sera maintenu à la cote 224 mNGF tandis que la cote de refoulement du siphon sera calée à 209 mNGF soit un dénivelé de 15 mCE.

Le linéaire estimé du siphon est de 70 m et le débit cible maximum est de 4 m³/s (DN800). A savoir que ce siphon devra également restituer des débits plus faibles de l'ordre de 500 L/s, ce qui va entraîner de par la faible vitesse de transfert un risque de désamorçage. Pour ce faire, un second siphon de diamètre plus petit sera installé.

Un siphon de diamètre 800 mm, dans les conditions évoquées ci-dessus et en tenant compte des différentes pertes de charge, est en capacité de débiter 3,40 m³/s.

GESTION DES PETITS DEBITS / DEBIT RESERVE

Le débit réservé est fixé à 500 L/s. Dans les mêmes conditions qu'évoquées au paragraphe précédent, le second siphon à mettre en œuvre aura un diamètre de 400 mm et sera en capacité de débiter environ 700 L/s.

Le cumul des débits de ces deux siphons permet de couvrir le débit maximum établi à 4 m³/s.

Ce siphon présente les avantages suivants :

- Travail en toute sécurité et sans contrainte sur le phasage des travaux ;
- Prélèvement continu d'une eau en partie haute de la retenue favorisant la qualité de l'eau rejeté.

Cependant, le principal inconvénient du siphon est son coût relativement élevé, estimé à 450 000€.

GESTION DES CRUES ET DU RISQUE DE SURVERSE

Le débit d'évacuation des siphons est établi à 4 m³/s. Si on tient compte de l'écrêtement des petites crues par ces siphons (à raison d'un débit de restitution de 4 m³/s durant la montée du plan d'eau jusqu'à la surverse), les volumes de crues en période juin-juillet deviennent les suivants :

Tableau 8 : Volume des crues saisonnières (juin-juillet) stocké au droit du barrage des Cambous avec fonctionnement du siphon (en m³)

T(an)	QP(m3/s)	LM1	LM2	LM3	LM4	LM6	LM12	LM24	LM48	LM72
112	164	586 876	1 145 232	1 654 856	2 116 244	2 889 104	4 489 724	6 128 068	7 516 732	8 007 512
56	121	433 984	849 740	1 234 000	1 583 912	2 181 436	3 445 644	4 814 288	6 007 776	6 478 716
20	73	258 400	507 748	742 960	961 308	1 348 652	2 224 244	3 261 188	4 223 788	4 602 224
10	51	174 576	343 944	505 252	657 136	932 384	1 579 196	2 400 380	3 196 820	3 475 312
8	46	156 720	309 224	454 908	592 160	842 112	1 437 836	2 203 964	2 952 912	3 202 636
7	42	140 600	277 604	408 656	532 764	759 776	1 305 404	2 015 732	2 711 236	2 927 480
6	37	125 596	248 092	365 504	477 088	681 532	1 177 436	1 832 336	2 471 420	2 652 572
5	34	111 708	220 688	325 452	424 884	608 248	1 056 412	1 653 776	2 232 844	2 377 540
4	30	98 564	195 020	287 756	376 152	539 180	941 216	1 479 184	1 990 548	2 098 540
3,3	27	86 288	170 840	252 168	329 776	473 832	829 864	1 308 436	1 752 716	1 819 664
2,8	24	74 756	147 776	218 316	285 756	411 088	722 108	1 139 920	1 512 404	1 538 184
2,3	21	63 720	126 076	186 324	243 968	351 196	618 320	974 132	1 273 952	1 258 316
2,0	18	53 304	105 368	155 820	204 040	293 908	517 012	810 824	1 036 492	984 400
1,6	15	43 384	85 900	126 804	166 096	239 348	420 912	653 592	805 728	717 304
1,4	13	34 208	67 672	99 896	130 880	188 384	330 020	504 792	587 736	462 608
1,1	11	25 652	50 684	74 724	97 772	140 644	244 336	363 556	378 176	216 468
1,0	9	17 592	34 688	51 164	66 772	95 632	163 116	228 892	174 940	-
0,8	6	9 408	18 568	27 108	35 152	49 504	78 672	85 424	-	-

La prise en compte du fonctionnement du siphon permet de repousser le risque de surverse.



3.2.2.1.4 Conclusions

À la vue des contraintes évoquées ci-avant, il apparaît nécessaire de privilégier la solution siphon qui permettra de simplifier les travaux, tout en limitant l'impact sur les débits restitués et le risque de surverse pendant les travaux.

3.2.2.2 Analyse des risques de défaillance et des solutions préventives envisagées

Les causes possibles de défaillance du système (désamorçage du siphon) sont :

- Un niveau amont trop proche de la prise d'eau du siphon (risque d'aspiration d'air) pouvant se produire en cas d'abaissement du plan d'eau ;
- La présence d'embâcle au niveau de la prise d'eau ;
- Une entrée d'air dans le siphon qui pourrait être due à une manipulation des vannes du siphon en crête du barrage.

Les conséquences d'une défaillance du siphon sont les suivantes :

- Coupure du débit réservé pendant un certain temps jusqu'à réamorçage du siphon ou déversement du barrage (non souhaité) ;
- Désordres sur le chantier du fait de la surverse : inondation de l'emprise du chantier batardeé et potentielle rupture du batardeau (merlon).

Les solutions préventives envisagées pour palier à un désamorçage du siphon sont les suivantes :

- Positionnement de la prise d'eau à 1/1.5 m sous le niveau du plan d'eau après abaissement de 2 m de celui-ci pour les travaux, ceci afin de parer au risque d'un désamorçage du fait d'un niveau d'eau trop proche de la prise d'eau ;
- Présence d'une crépine pour éviter le blocage du siphon par des embâcles ;
- Présence d'un dispositif de type capteur de débit, relié à un système de télégestion sur batterie permettant l'envoi d'un sms vers le téléphone d'une personne d'astreinte lors de la détection d'un faible débit (il faudra s'assurer d'une couverture réseau) ;
- Présence de petit matériel type pompe thermique en rive droite pour réamorçage du siphon par l'entreprise si nécessaire.

Le délai maximum pour réamorcer le siphon avant un risque de surverse du barrage est calculé ci-après. Le plan d'eau sera abaissé à la cote de 224 m NGF (3 m d'abaissement) durant les travaux, ce qui représente une capacité de stockage d'environ 400 000 m³. D'après le Tableau 7, le débit moyen mensuel maximum est de 2.7 m³/s. Le délai de remplissage du plan d'eau est donc de 41.1h, la cote du plan d'eau augmente alors de 7.3 cm/h en cas d'avarie du siphon.

Nota : en considérant la $Q_{5\text{hum}}$ le débit moyen mensuel maximum est de 4.40 m³/s, le délai de remplissage est donc de 25.2 h, la cote du plan d'eau augmente alors de 11.9 cm/h.

Ce délai laisse suffisamment de temps à une personne d'astreinte le week-end d'organiser le réamorçage du siphon.

3.2.3 Mise en place d'un merlon faisant office de batardeau

Afin d'isoler le chantier des venues d'eau de la retenue aval, un batardeau de type merlon sera mis en place. Ce batardeau fera environ 2,5 m à 3 m de hauteur pour 3 m de largeur en crête avec des talus qui auront un fruit d'environ 3H/2V. Il sera mis en place avec des matériaux réputés étanches afin de limiter les venues d'eau au sein de la zone de travaux notamment vis-à-vis de l'exécution de la protection en béton de la fosse de dissipation (Zone 1 sur la Figure 71). Les matériaux pourront être de type : granulaire à laquelle une géomembrane est apportée afin d'assurer l'étanchéité ou de type argile limoneuse avec une protection extérieure de type géotextile et enrochements.

Le batardeau sera mis en œuvre dans une zone de « haut-fond » du cours d'eau, où un seuil semble s'être formé avec le temps. La côte de crête sera calée à 212 m NGF.

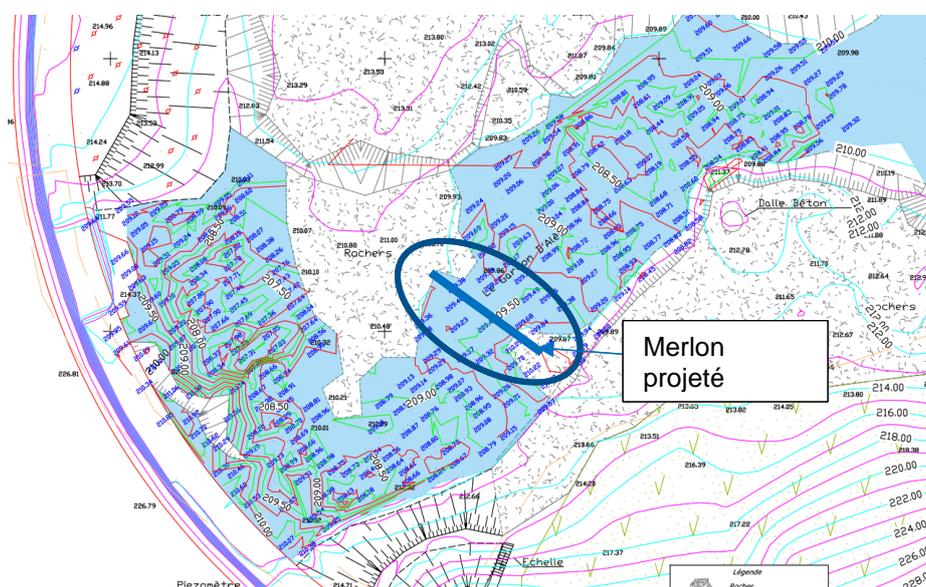
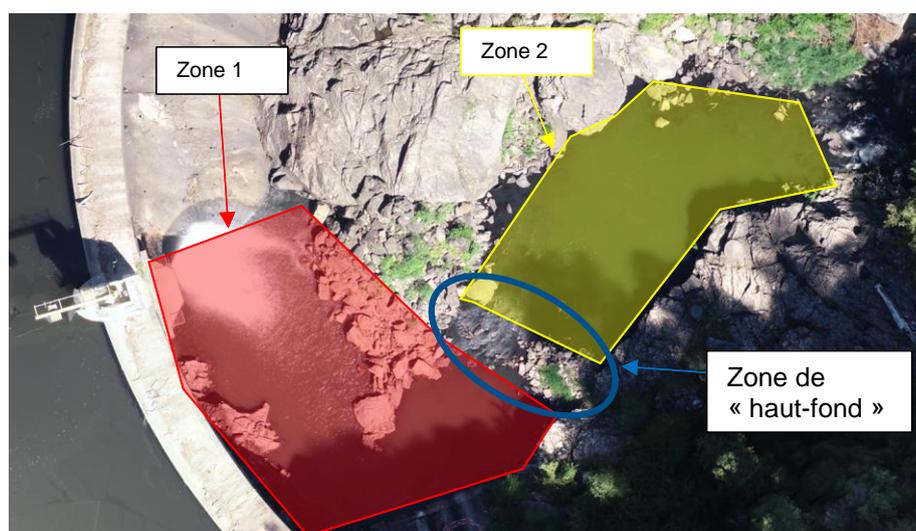


Figure 71: Vidange du bassin de dissipation et batardeage de celui-ci

En complément, une pompe sera mise en œuvre « dans la cuvette » (avec un fond autour de 207.5 m NGF) qui se trouve une dizaine de mètres devant les chambres aval (cf. Figure 71).