



Maîtrise d'œuvre relative à la restauration du barrage de Bouzey

Dossier de Consultation des Entreprises

DONNEES DE BASE

8210492 – DCE – ANX.2 – A



Maîtrise d'œuvre relative à la restauration du barrage de Bouzey

Dossier de Consultation des Entreprises

Voies Navigables de France

Données de base

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI(E) PAR	CONTROLÉ(E) PAR	APPROUVÉ(E) PAR	DATE
A	Première émission	MRY	MRY	USP	20/05/2022
Barrage, Hydroélectricité et Infrastructures 6, rue de Lorraine, 38130 Echirolles – TEL : +33(0)4 76 33 40 00					

SOMMAIRE

1. TOPOGRAPHIE	6
1.1. Référentiel topographique	6
1.2. Campagnes de levés topographiques.....	6
1.3. Revanche.....	6
2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	9
2.1. Cadre géologique	9
2.2. Description des formations	10
2.3. Tectonique	11
2.4. Sismicité.....	12
2.5. Hydrogéologie.....	13
3. GÉOTECHNIQUE	14
3.1. Informations à disposition.....	14
3.2. Campagne de 1932 et rapport « procédé Rodio » de 1933.....	14
3.3. Campagne de Fondasol de 2006	15
3.4. Campagne de Hydrogéotechnique de 2012	17
3.5. Mission G2-AVP GEOTEC de 2017	21
3.6. Campagne GEOTEC de 2020.....	26
3.7. Synthèse.....	30
3.8. Modèle géotechnique	31
4. CLIMATOLOGIE	32
4.1. Neige.....	32
4.2. Vent	32
4.3. Séisme.....	33
5. DONNÉES HYDRAULIQUES.....	34
5.1. Résultats principaux des études hydrologiques et hydrauliques	34
5.2. Cotes de retenue caractéristiques	34
5.3. Niveau d'eau dans l'évacuateur de crues projeté	35

5.4. Vitesses d'écoulement..... 36

TABLEAUX

Tableau 1 - Calculs de revanche	7
Tableau 2 - Résultats des essais Lugeon	16
Tableau 3 - Caractéristiques des enrochements trouvées par Hydrogéotechnique	18
Tableau 4 - Caractéristiques de la maçonnerie trouvées par Hydrogéotechnique	18
Tableau 5 - Caractéristiques des alluvions trouvées par Hydrogéotechnique.....	19
Tableau 6 - Caractéristiques du substratum gréseux massif trouvées par Hydrogéotechnique ..	19
Tableau 7 - Caractéristiques du substratum gréseux altéré trouvées par Hydrogéotechnique...	20
Tableau 8 - Résultat des résistances à la compression uniaxiale dans les enrochements.....	22
Tableau 9 - Résultat des résistances à la compression uniaxiale dans la maçonnerie	22
Tableau 10 - Résultats des essais Lugeon (SC1 et SC2)	23
Tableau 11 - Résultat des résistances à la compression uniaxiale dans le grès	24
Tableau 12 - Niveau d'eau relevé dans les sondages en fin de campagne	25
Tableau 13 - Propriétés géomécaniques des formations pour les sondages 2020 – SP1 à SP3 ...	27
Tableau 14 - Propriétés géomécaniques des formations pour les sondages 2020 – SP4 à SP6 ...	29
Tableau 15 – Propriétés géomécaniques des formations pour les sondages 2020 – SP7.....	29
Tableau 16 - Propriétés statiques et dynamiques des formations	31
Tableau 17 - Propriétés géomécaniques des formations	31
Tableau 16 – Principaux résultats des études hydrologique et hydraulique.....	34
Tableau 16 – Cotes de retenue caractéristiques	34
Tableau 16 – Synthèse des débits et niveaux d'eau	36
Tableau 16 – Vitesses de l'écoulement sur l'évacuateur de crues en situation de crues Q3000 et 1,5*Q10000	37

FIGURES

Figure 1 - Vue aérienne et extrait de la campagne topographique de la rive gauche.....	7
Figure 2 - Extrait de la carte Géologique d'Epinal au 1/50 000 avec les failles principales	9
Figure 3 - Carte épicentres départementaux des Vosges – Source SisFrance – BRGM.....	13
Figure 4 - Profil des niveaux d'eau mesurés en 2006.....	17
Figure 5 - Implantation des sondages carottés GEOTEC	21
Figure 6 - Vue des matériaux sableux sous le barrage à hauteur du SC4 entre 24 et 27m	24
Figure 7 – Implantation des sondages de 2020	26
Figure 8 – Synthèse des informations disponibles issues des plans d'archive et de la campagne de 2020	28
Figure 8 – Carte des valeurs de neige à prendre en compte en France métropolitaine	32
Figure 8 – Carte de la valeur de base de la vitesse de vent de référence en France	32
Figure 8 – Zonage sismique de France métropolitaine	33
Figure 8 – Vitesses d'écoulement dans l'évacuateur de crue issues du modèle numérique	36

OBJET DU DOCUMENT

Le présent document constitue le volume 3 des études PRO de réhabilitation du barrage de Bouzey, considérant une cote de retenue normale de 371.50 m NGF.

Il présente les données topographiques, géologiques et géotechniques et qui ont été retenues pour la réalisation du présent avant-projet.

Ce document est identique au Volume 3 des études AVP.

1. TOPOGRAPHIE

1.1. REFERENTIEL TOPOGRAPHIQUE

Au cours de la vie de l'ouvrage, différents systèmes de coordonnées altimétriques et planimétriques ont été utilisés pour les plans et autres documents relatifs à l'exploitation. On rencontre ainsi dans les documents d'archive les systèmes planimétriques Lambert I ou CC48, et les systèmes altimétriques Bourdaloue ou IGN 69.

Les coordonnées fournies dans les documents d'archive ont été mises en cohérence par ARTELIA.

Dans la suite de l'étude, les référentiels topographiques utilisés sont les suivants :

- Planimétrie : Système RGF93 CC48 ;
- Altimétrie : Système NGF IGN 69.

1.2. CAMPAGNES DE LEVES TOPOGRAPHIQUES

Les plans AVP sont basés sur les résultats des levés topographiques réalisés en :

- 2010 (aval du barrage) ;
- 2011 (partie centrale du barrage) ;
- 2016 (rives gauche et droite) ;
- 2020 (totalité du barrage et aval jusqu'à la route).

1.3. REVANCHE

La campagne de levé topographique réalisée en octobre 2016 dans le cadre de la MC0 par le bureau d'études Techniques TOPO [1] avait notamment pour but de clarifier l'altimétrie en rive gauche, de manière à statuer sur la possibilité de débordement en cas d'épisode climatique extrême (PHE avec formation de vague notamment).

La campagne topographique de 2016 confirme l'existence en rive gauche d'une zone plus basse que le couronnement du barrage. Plus précisément, la topographie en rive gauche est telle que :

- L'altitude de la route en prolongement de la crête s'élève à mesure que l'on s'éloigne du barrage et fait office de crête en rive gauche ;
- Au minimum, l'altitude de cette route est de 372.65 m NGF. Le point bas est situé à quelques mètres seulement du barrage ;
- La zone située entre la route goudronnée et la retenue, où se trouvent notamment le local de location de vélos et le sentier piéton, est à une altitude plus basse que la route.

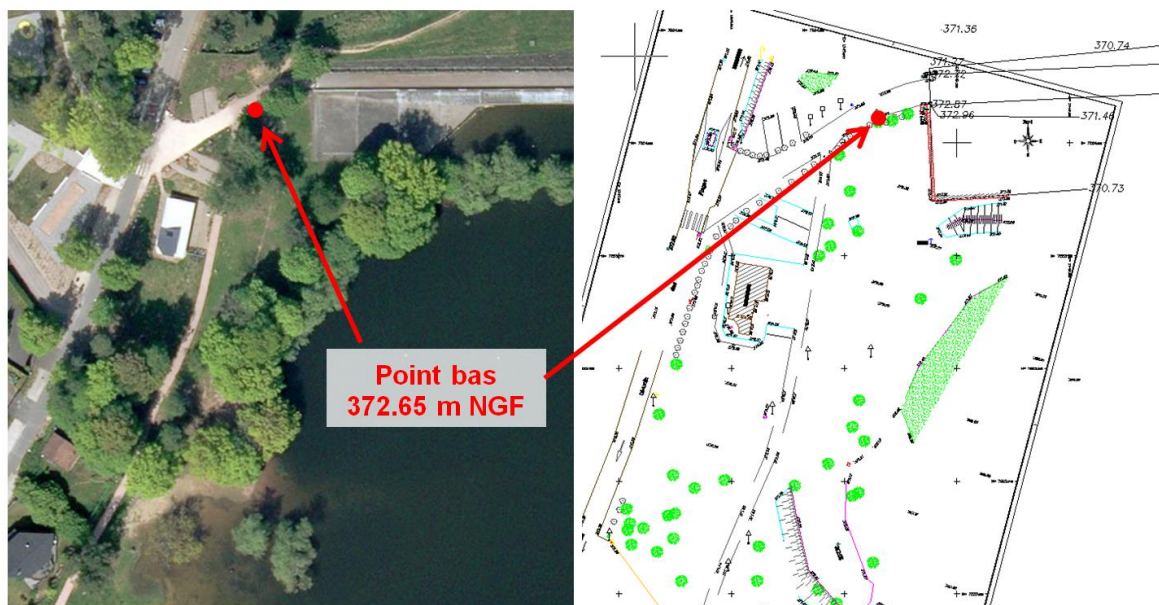


Figure 1 - Vue aérienne et extrait de la campagne topographique de la rive gauche

Le point le plus bas de la rive gauche est situé à une altitude supérieure aux cotes de RN (371.50 m NGF) et de PHE (372.34 m NGF). L'altitude du local de location de vélos est par ailleurs supérieure à la cote de PHE.

Un calcul de revanche est toutefois réalisé afin d'évaluer la possibilité de déferlements de vagues en rive gauche en cas de vent important. La méthodologie suivie pour ce calcul est celle définie par le CFBR dans « Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrage » de juin 2013 [2].

Les données de vent sont issues des documents suivants :

- Carte des vents de l'Annexe de l'Eurocode 1 (fournissant les vitesses de référence pour une période de retour de 50 ans) ;
- Rose des vents de la station météo d'Epinal, permettant de connaître la direction principale des vents et les ratios de vitesse entre la direction principale et les directions secondaires.

Plusieurs cas ont été calculés, afin d'identifier les configurations les plus défavorables. Les principaux résultats sont rassemblés dans le tableau suivant :

Tableau 1 - Calculs de revanche

	CAS 1		CAS 2		CAS 3		CAS 4	
	Fetch selon axe principal des vents, avec axe tangent à l'extrémité Ouest du barrage (point bas)		Fetch selon axe principal des vents, avec axe le plus long orienté vers le barrage		Fetch selon axe face à l'extrémité Ouest du barrage (point bas), avec correction de la valeur des vents /t axe principal		Fetch le plus long, avec correction de la valeur des vents /t axe principal	
Condition de retenue	RN	PHE	RN	PHE	RN	PHE	RN	PHE
Niveau m NGF	371.5	372.34	371.5	372.34	371.5	372.34	371.5	372.34
Période de retour du vent (années)	1000	50	1000	50	1000	50	1000	50
Fetch	650		750		950		1670	
Angle entre la direction du vent et des vagues	40°		40°		0°		15°	
Vent de référence m/s	29	24	29	24	14	12	14	12
Vitesse efficace ajustée du vent U_a m/s	30.3	24.2	30.4	24.3	17.3	14.0	16.8	13.6

Données de base
MAITRISE D'ŒUVRE RELATIVE A LA RESTAURATION DU BARRAGE DE BOUZEY

Hauteur de vague de projet Hd m	0.37	0.30	0.40	0.32	0.26	0.21	0.33	0.27
Déferlement R m	0.46	0.37	0.50	0.40	0.32	0.26	0.41	0.33
Niveau maximum de la vague m NGF	371.96	372.71	372.00	372.74	371.82	372.60	371.91	372.67

Ces résultats amènent les commentaires suivants :

- De manière générale, pour un axe de fetch donné, la condition la plus défavorable est obtenue pour le vent cinquantennal se produisant sur une retenue à la cote PHE ;
- La situation la plus défavorable se produit pour le cas 2 (fetch le plus long possible selon l'axe principal des vents), pour laquelle la cote de crête minimale est de 372.74. La crête du barrage étant à la cote 373.10 (et la cote de parapet à 374.10), la revanche existante de l'ouvrage s'avère suffisante ;
- A l'extrémité Ouest du barrage, le point bas topographique (372.65 m NGF) est légèrement en-dessous des cotes de crête calculées pour les cas 1, 2 et 4. Cependant, comme :
 - l'axe principal des vents (théoriquement responsable des plus fortes vagues) est parallèle à la berge où les points bas sont relevés,
 - la zone des points bas est à faible pente sur une grande surface, avec plusieurs éléments de rugosité de surface (végétation, murets, mobilier urbain) ;

les vagues générées selon cet axe seront naturellement atténuées (déferlement glissant et frottement important) avant d'atteindre le chemin piéton (dans la continuité de la crête du barrage) où les points les plus bas sont relevés. Il est donc raisonnable de considérer que les phénomènes de vent générateurs de houle n'induisent pas de risque de surverse sur la zone à l'extrémité Ouest du barrage.

En définitive, la cote de crête actuelle du barrage de Bouzey et la topographie en rive gauche permettent de disposer d'une revanche suffisante pour les situations de projet à considérer vis-à-vis du vent. En particulier, il n'apparaît pas nécessaire de rehausser la rive gauche pour éviter le déferlement de vagues.

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

2.1. CADRE GEOLOGIQUE

Le barrage est fondé sur la formation dite de « grès bigarré ».

La carte géologique d'Epinal au 1/50 000 donne des informations sur la structure générale de la géologie locale dominée par un réseau d'accidents cassants, correspondant à un nœud tectonique.

D'après la carte géologique et notre connaissance de ce secteur, sous les remblais d'aménagement du site, la géologie attendue est la suivante :

- Des alluvions récentes de l'Avière, limoneuses à sablo-graveleuses ;
- Substratum gréseux du Buntsandstein supérieur, qui peut comprendre :
 - Les Couches intermédiaires (t2a) en rive droite (surmontant les grès à Voltzia t2b) ;
 - Le Grès à Voltzia (t2b) en rive gauche et sous les grès des couches intermédiaires en rive droite.

A noter, la présence de la faille de Renauvoid recoupant l'axe du barrage, légèrement coté rive droite.

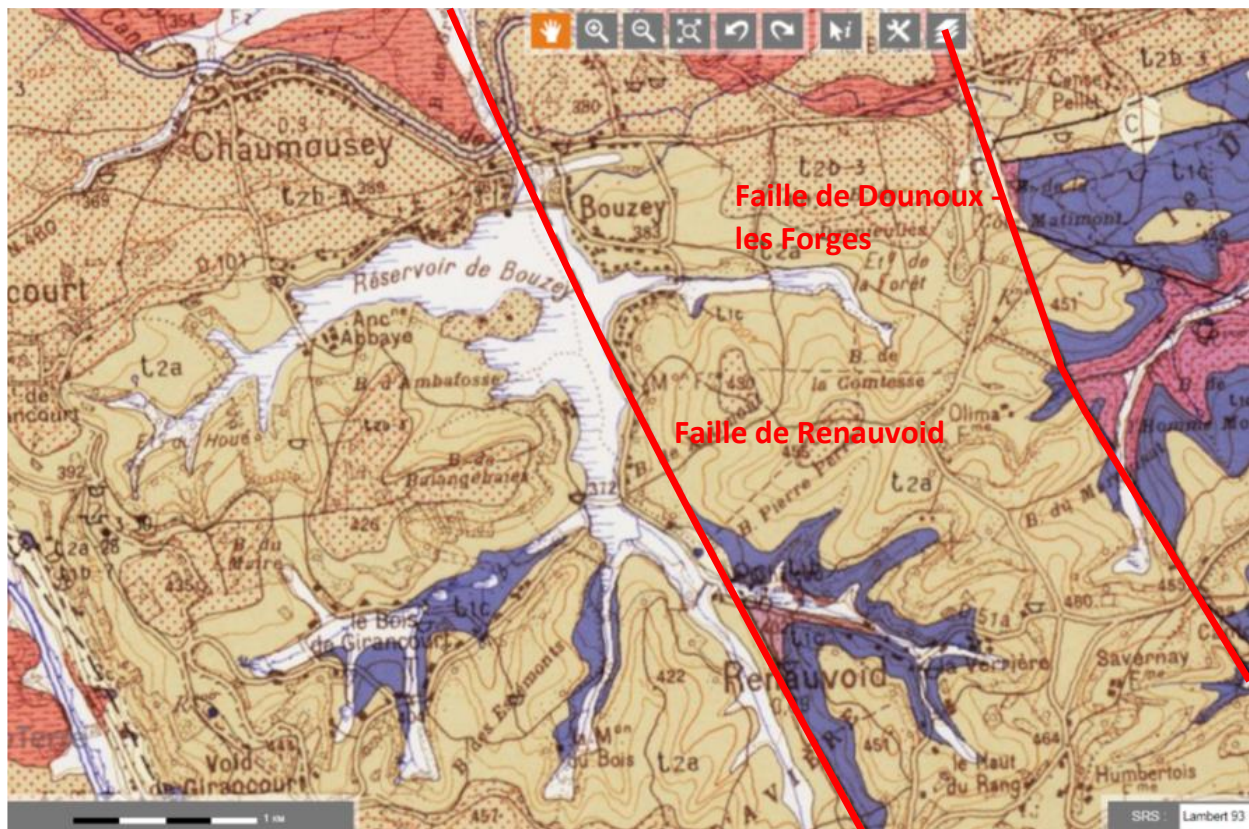


Figure 2 - Extrait de la carte Géologique d'Epinal au 1/50 000 avec les failles principales

2.2. DESCRIPTION DES FORMATIONS

Le substratum gréseux concerné est celui du Buntsandstein supérieur (sommets du Trias inférieur) assise dite des « Grès bigarrés » se déclinant sous l'emprise du barrage en Couches intermédiaires (entre les grès à Voltzia plus récents et les grès du Buntsandstein moyen représenté notamment par les grès vosgiens et le conglomérat principal plus anciens) et en grès à Voltzia.

Cet ensemble gréseux, dont la puissance moyenne varie de 65 m au SW à 80 m au NE du secteur du barrage, marque l'arrivée d'un nouvel épandage détritique dans le bassin. Il montre une évolution progressive, depuis des faciès basaux grossiers et mal classés (Couches intermédiaires inférieures), d'origine purement fluviale, jusqu'à des faciès fins et très bien classés (Grès à Voltzia), où commencent à se manifester quelques influences marines. Dans l'ensemble, en faisant abstraction des dislocations de détail, les couches plongent vers l'aval (vers le Nord-nord-ouest).

De l'amont de la retenue à l'aval du barrage, on remonte donc dans les séries triasiques avec, au plus profond des sondages et en queue de retenue, le conglomérat de base, puis l'importante série des couches intermédiaires, trouvées principalement en fondation du barrage et enfin, de manière superficielle côté nord-ouest, les grès à Voltzia.

D'après les sondages et les descriptions et observations de terrains (et des carrières voisines du site) trouvées dans les rapports des différentes campagnes d'investigations, le rapport de la société Sondages-Etanchements-Consolidation et la notice de la carte géologique du BRGM au 1/50 000, la description des grès est présentée ci-après du plus ancien au plus récent :

2.2.1. Buntsandstein moyen

Dans les sondages effectués en 1932 aux profils 40, 140, 201 et 243, on retrouve une assise caractéristique intitulée « gros graviers », à la base du sondage au P40 en rive droite. Il s'agit de conglomérats rouges à gros galets quartzeux caractéristiques de la partie inférieure du Trias Vosgiens (grès Vosgien t1b) encore appelés « conglomérats principal et Zone-limite violette » (t1c). En surface, ces assises à gros galets commencent à affleurer à l'extrémité amont de la retenue, puis elles se développent vers le Sud Est. Ce sont les assises les plus inférieures qui aient été reconnues dans la zone de la fondation du barrage. N'ayant pas été retrouvées dans les autres sondages, on peut voir en plus de l'effet du pendage l'effet dans cette zone de petite failles dénivellant les couches.

2.2.2. Couches intermédiaires t2a

Elles affleurent très largement, sur toute leur épaisseur (45-50 m en moyenne), dans la zone de la retenue, où dominent les bas plateaux boisés (forêts d'Avière) entaillés de profonds vallons. Deux ensembles superposés peuvent y être distingués, entre lesquels il n'est cependant jamais possible de placer une limite franche. C'est dans ce faciès, qui se fait remarquer par la fréquence des intercalations marneuses que le barrage de Bouzey est fondé essentiellement.

Les Couches intermédiaires inférieures se développent sur les 2/3 environ de la puissance totale. Sur les plateaux, elles sont presque totalement masquées par les faciès sableux résultant de leur désagrégation (région d'Epinal). Elles se présentent généralement en gros bancs, à stratifications obliques, où les litages tabulaires peuvent être très inclinés.

Les faciès présentent une teinte soutenue (rouge-brun à lie-de-vin), due à la présence d'une matrice argilo-ferrugineuse, et qui passe facilement au jaune orangé par lessivage superficiel, surtout dans les zones les plus fracturées. Les grains (dimension moyenne 0.2 à 0.4 mm) sont plutôt anguleux et mal classés ; les feldspaths sont très abondants (autour de 25 %) et le mica blanc, en larges paillettes, toujours présent. Les faciès gréseux les plus grossiers, riches en éclats de quartz de plusieurs millimètres et en minuscules "galets mous" argileux, prennent souvent en surface un aspect vacuolaire caractéristique (leur forte porosité est parfois comblée par un ciment de barytine).

Les graviers de quartz, de 1 à 2 cm, et les petites cavités sphériques, centimétriques, tapissées d'un enduit ferromanganeux noirâtre, sont assez fréquents, mais leur densité reste toujours faible.

Les Couches intermédiaires supérieures, dont la puissance n'excède pas 15 m, se distinguent surtout par leur hétérogénéité ; elle est marquée par les contrastes granulométriques entre les différents bancs gréseux, habituellement plus minces que précédemment, et par la présence de nombreuses lentilles argileuses de grande taille.

Les petits galets et les taches noires sont devenus rarissimes et strictement localisés en base de banc. Aux affleurements, les grès prennent presque toujours une teinte jaune orangé, veinée de roux par des précipitations tardives d'hydroxydes de fer, mais ils peuvent être totalement décolorés. Très mal cimentés dans l'ensemble, ils ont parfois été exploités en sablières et marquent en maints endroits un replat très net dans la topographie. Certains niveaux annoncent déjà le Grès à Voltzia par la finesse de leur grain et/ou la présence de débris végétaux.

Bien qu'il n'existe aucun indice pétrographique précis permettant de le vérifier rigoureusement, il est possible que la rive gauche de la fondation du barrage de Bouzey intéresse cette formation.

2.2.3. Grès à Voltzia t2b

Largement dégagé par l'érosion, surtout dans le quart sud-ouest de la feuille, il se traduit par une morphologie mollement ondulée, couverte principalement de prairies, dont l'enveloppe correspond sensiblement à la surface structurale du toit du Buntsandstein. Il n'existe pas d'affleurements naturels, mais d'innombrables carrières, pour la plupart abandonnées de longue date, y ont été exploitées pour la pierre de taille et pour la confection de meules à aiguiser. Sur les 25-30 m de puissance moyenne totale, il est aisé de distinguer deux unités superposées, dont la limite est cependant imprécise et fluctuante.

Le Grès à meules constitue entre la moitié et les deux tiers inférieurs de la formation. Plus massif que le niveau sous-jacent, il marque souvent un ressaut dans la topographie, dominant le replat des Couches intermédiaires supérieures ; cette rupture de pente a été largement utilisée pour le tracer des contours. En carrière il se présente comme un empilement de grandes "lentilles" gréseuses à base érosive, de plusieurs dizaines de mètres de large et quelques mètres d'épaisseur, correspondant à des remplissages de chenaux fluviaux successifs. Les bancs paraissent massifs en première observation, mais de discrètes variations de teinte permettent presque toujours d'y déceler de fines laminations faiblement pentées ou horizontales. Ils ne sont généralement séparés que par de minces joints argileux, souvent gris verdâtre, ou par des niveaux psammitiques, d'extension très restreinte, à muscovite et biotite verte.

Les teintes sont généralement assez pâles : rougeâtre, jaunâtre, gris verdâtre à blanchâtre. Le grain est remarquablement fin et constant (mode : 0.1 mm), et le mica blanc est relativement abondant.

Cette formation ne concerne a priori pas directement la fondation du barrage de Bouzey mais les sensibles ressauts topographiques en rive gauche du barrage et à l'aval.

2.2.4. Alluvions de l'Avière Fz

Dans les vallées et vallons secondaires le remplissage alluvionnaire de fond de vallée est de l'ordre de 5-6m. Sous des limons argileux, épais de 1 à 2 m, peuvent se trouver localement des alluvions grossières provenant des formations locales.

2.3. TECTONIQUE

Le barrage de Bouzey se situe dans le prolongement occidental du horst d'Epinal. Le horst d'Epinal est limité au Nord par la faille de Grandvillers, qui est à quelques kilomètres au sud de la faille de Vittel (faille décrochante). Ce horst est parcouru par une série de fractures obliques de direction N125 à N150 (faisceau de la Moselle). Au sens strict, le horst d'Epinal est limité vers l'Ouest par la faille oblique de Dounoux - Les Forges, où le revêtement sédimentaire présente un pendage nord assez faible (10 % environ). Sa structure s'abaisse ensuite progressivement à la faveur de ces failles parallèles au faisceau de la Moselle (faille de Renauvoid, faille de Girancourt et faille de Lerrain) qui font ainsi partie du réseau de failles significatives de la région.

La première de ces failles à l'Ouest de la faille de Dounoux-Les Forges, la faille de Renauvoid, traverse la fondation du barrage de Bouzey dans le sens amont aval.

Il est mentionné dans la carte géologique du BRGM, feuille d'Epinal :

« C'est probablement cette faille, non décelée par les levés antérieurs, qui est responsable, indirectement, de la rupture catastrophique du barrage de Bouzey le 27 avril 1895 ; la formation de renards ayant été favorisée par la densité des diaclases satellites, de direction transverse à l'ouvrage, et par le faible taux de cimentation des Couches intermédiaires affectées. »

2.4. SISMICITE

Dans ces conditions, et conformément à la pratique, il convient de vérifier si la faille de Renauvoid est active ou non. En général, il est d'usage de supposer qu'une faille est considérée non active si elle n'a pas connu d'activité depuis plus de 5 000 ans. L'analyse des dossiers de l'ouvrage, ainsi que des études antérieures et de la notice géologique du BRGM (feuille d'Epinal), ne relèvent pas de risque sismique particulier relatif à cette faille.

Le séisme historique **proche le plus fort connu** est le séisme de Remiremont (1682), qui éclipse d'autres séismes proches ou supposés tels, inégalement connus, où un séisme d'intensité épicentrale 8 s'est produit en 1682 et où une crise sismique a été enregistrée en 1984 / 1985 (magnitude maximale atteinte de 5.5). Ce séisme a introduit l'hypothèse d'une intensité maximale VII dans la région Sud des Vosges. Ailleurs, dans le secteur nord d'Epinal, l'intensité maximale VI est reconnue.

Les tremblements de terre proches anciens, dont les épicentres ne pas situés avec précision, datent de 1757, 1821 (mise en mouvement de "cailloux... sur le versant des coteaux"), 1829, 1851 et 1916.

Parmi les événements récents, mieux et souvent bien connus, relevons les séismes proches de 1948 dont l'épicentre serait situé en aval d'Epinal, de 1971 dont l'épicentre est situé dans la région de Brouvelieures, 1974, avec épicentre instrumental au Nord-Est d'Epinal, mais d'interprétation macrosismique malaisée avec une intensité de l'ordre de IV dans la région d'Epinal.

Dans la région d'Epinal, les intensités de ces séismes sont toujours modestes.

Le 22 février 2003 à 20 h 41 mn, un séisme de magnitude régionale 4,1 est survenu sur la retombée Ouest du massif des Vosges dont l'épicentre a été localisé en première approximation à 13 km au Nord-Ouest de Saint-Dié (Vosges – 88). Saint-Dié est à moins de 50 km de Bouzey. L'évènement de Saint-Dié se situe dans les Vosges, région connue pour son activité sismique notable dans le contexte de faible à très faible sismicité de la région Est de la France.

Dans ce contexte général, le séisme de Saint-Dié est un événement relativement fort mais pas exceptionnel en termes de valeur de magnitude/réurrence.

D'après la base de données SisFrance du BRGM, Sismicité historique de la France Métropole, la carte des épicentres actualisée dans le secteur d'Epinal est la suivante :

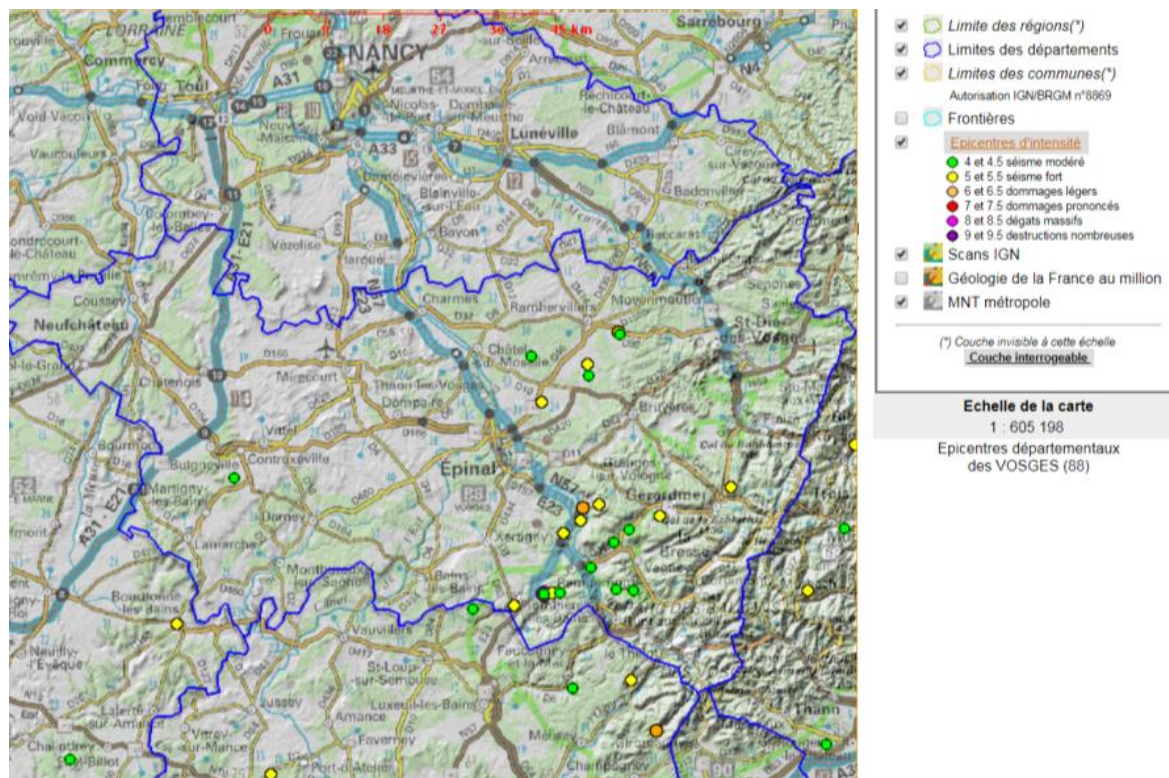


Figure 3 - Carte épicentres départementaux des Vosges – Source SisFrance – BRGM

La sismicité de la faille de Renauvoid n'est donc pas mise en évidence par les événements récents ou historiques.

En revanche, ses impacts en termes de dégradation du massif gréseux et de perméabilité de la fondation ne sont pas négligeables, comme on le verra dans ce qui suit.

2.5. HYDROGEOLOGIE

Les terrains du Buntsandstein moyen (Conglomérat principal et Grès vosgien) constituent l'aquifère le plus important de la région tant en affleurement que sous couverture.

Ils donnent naissance à de nombreuses sources dont la plupart sont issues du Conglomérat principal. Celui-ci, du fait de sa perméabilité importante, constitue un drain privilégié collectant les eaux des formations sus-jacentes. Le débit des sources peut être important (50 à 180 m³/h).

La nappe des grès du Buntsandstein moyen est aussi captée par forage lorsqu'elle est sous couverture. Les débits sont très variables d'un forage à l'autre (généralement 15 à 30 m³/h, parfois 50 m³/h, exceptionnellement 140 m³/h (Epinal)).

Les grès du Buntsandstein supérieur donnent naissance à de nombreuses sources dont les débits ne sont jamais aussi importants que ceux des sources du Conglomérat principal sous-jacent.

Les sources issues de cet aquifère sont particulièrement abondantes dans les secteurs où une ligne d'émergences existe entre Couches intermédiaires et Grès à Voltzia.

3. GEOTECHNIQUE

3.1. INFORMATIONS A DISPOSITION

Le barrage est fondé sur une formation de grès bigarré.

Quatre campagnes d'investigations géotechniques ont été réalisées jusqu'à présent :

- En 2006, par la société FONDASOL [3] ;
- En 2012, par la société HYDROGEOTECHNIQUE [4] ;
- En 2016, par la société GEOTEC [5].
- En 2020, par la société GEOTEC [6]

Ces campagnes viennent compléter le rapport sur les conditions géologiques de 1933 [7] et les sondages carottés réalisés en 1932 à l'axe du barrage.

Un rapport concernant les travaux d'injection de 1927 est également disponible, bien qu'aucun plan ne vienne confirmer la localisation précise des rideaux d'injection.

Sur des plans d'archive datant de 1887, on retrouve également des sondages présentés sur une coupe verticale parallèle à l'axe de la digue, à 25 m en aval du parement amont (présentant la dureté relative des roches).

3.2. CAMPAGNE DE 1932 ET RAPPORT « PROCÉDE RODIO » DE 1933

D'après les documents plans recueillis, 6 sondages carottés ont été réalisés à l'axe du barrage, numérotés 1 à 6 aux profils P40, P140, P201, P243, P315 et P406.50 respectivement.

A la suite de ces sondages, l'assise dans la zone de fondation alternativement marneuse et gréseuse est confirmée, en couches subhorizontales. Dans son rapport de 1933, « Procédés Rodio » rappelle les inconvénients notoires de l'hétérogénéité et l'horizontalité de cette fondation : les couches de résistance inégales travaillent inégalement aux pressions, pouvant se fracturer sous la charge de l'ouvrage ; par les joints subhorizontaux (pendage aval), des cheminements naturels peuvent favoriser les écoulements amont-aval d'infiltration.

Les assises marneuses, réputées imperméables, sont probablement lenticulaires et ainsi contournées par les infiltrations. Les bancs gréseux présentant par nature une porosité et une perméabilité, ne pourraient donner passage à de faibles quantités d'eau d'infiltration, mais leur caractère fracturé et fissuré mis en évidence dans les sondages augmente significativement leur perméabilité en grand sous l'ouvrage. On trouve en effet, sous les sondages n° 2 à 5 situés sous les parties les plus hautes de l'ouvrage, de nombreux niveaux de grès altérés (en jaune) devenus pulvérulents ou friables. La présence de passages oxydés suggère par ailleurs la circulation d'eaux souterraines. Ces phénomènes sont marqués dans les zones superficielles sous le barrage, du fait de l'altération par la décomposition venant des zones superficielles, mais sont rencontrés également à des profondeurs importantes (36-38 m au P140 et 44-48 m au P243). On trouve également des passages de grès dur fissuré sous l'ouvrage, indiquant la présence de fissures ouvertes suspectées dans les zones superficielles, au contact de la maçonnerie et du rocher.

On trouve notamment, au centre du barrage (P201) juste sous la maçonnerie, des bancs de sables « purs » paraissant meubles et bien lavés, résultant probablement de la désagrégation du grès initial.

Le rapport recommande plusieurs étapes pour l'étanchéification de la fondation :

- La réalisation de sondages avec essai d'eau afin de mieux dimensionner l'espacement et la profondeur des injections à réaliser ;
- L'injection à très faible pression et coulis concentré des fissures ouvertes dans les grès en partie superficielle de la fondation ;

- Des injections plus profondes avec pressions moyennes (pour éviter de soulever la fondation et de fissurer la maçonnerie) et coulis très dilués pour obturer les joints entre marnes et grès ;
- De cimenter les passages sableux au moyen d'injections pénétrantes de produits chimiques spéciaux ;
- D'étendre les injections aux rives, pour arrêter les pertes par cheminements latéraux, et en particulier la rive droite où les talwegs sont les plus proches et le phénomène de décomposition depuis la surface le plus actif (profondeur, longueur).

L'objectif principal étant le traitement du sous-bassement du barrage pour éviter les sous-pressions et approfondir l'étanchéité pour limiter le débit et la vitesse des infiltrations en opérant un contournement du chemin d'infiltration sous le barrage.

3.3. CAMPAGNE DE FONDASOL DE 2006

Cette campagne avait pour vocation la réalisation de 3 sondages carottés et de 7 sondages destructifs pour la pose de piézomètres dans la fondation en pied de barrage, en rive gauche et en rive droite, et en travers du barrage. 10 sondages destructifs supplémentaires ont été effectués en 2005-2006 toujours pour la pose de piézomètres.

Ces investigations se sont inscrites dans le cadre d'une mission G0 au sens de la norme NF P94-500.

15 essais Lugeon ont été réalisés dans les sondages SC3 (situé dans l'intrados du coude à l'aval du coursier de l'évacuateur), le SD1 (pied aval rive gauche), le SD3 (pied aval prise d'eau), et SD5 (pied aval axe coté rive droite). La pression d'injection maximale atteinte est de 6 bars, mais la plupart des essais n'ont pas pu monter du tout en pression.

3.3.1. Observations sur les caisses de carottes et les logs de sondages

L'analyse des photos et des logs de carottes rejoint celle des sondages de 1932 : on trouve, intercalés avec des niveaux de roche intacte, des passages très fracturés ou altérés voire sableux sur plusieurs décimètres à des profondeurs très variables. Les RQD sont très variables (de 11 à 98) avec une moyenne variant entre 53 et 72. Une analyse RMR de la fondation, en considérant les résultats de résistance à la compression obtenu en 2017 par GEOTEC, les photos des carottes, les niveaux d'eau stabilisés dans les sondages et l'orientation des discontinuités dans la fondation par rapport à l'ouvrage (défavorable), on obtient des RMR de 20 à 26 ce qui correspond à une qualité de masse rocheuse faible.

Les sondages destructifs sont par nature plus difficilement interprétables, la limite entre enrochement et grès pouvant être floue, et la distinction entre les formations meubles de surface et les sables issus de la décomposition des grès délicate.

L'implantation de ces sondages est présentée sur le plan GEO-03.

3.3.2. Essais Lugeon

Les résultats des essais Lugeon sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 2 - Résultats des essais Lugeon

Base obturateur (m)	Base du forage (m)	SC3 perméabilité	RQD	SD1	SD3	SD5
6.8 m	8.5 m					5.1 10 ⁻⁵ m/s (88 l/min à 0.09 MPa)
7.5 m	8.5 m					1.1 10 ⁻⁴ m/s (59 l/min à 0.04 MPa)
8 m	9 m	1.7 10 ⁻⁴ m/s (90 l/min à 0.04 MPa)	40			
9.9 m	11 m	1.3 10 ⁻⁴ m/s (69 l/min à 0.04 MPa)	74			
10 m	12 m				5.2 10 ⁻⁵ m/s (82 l/min à 0.12 MPa)	
11 m	12 m				2 10 ⁻⁵ m/s (60 l/min à 0.22 MPa)	
13	15 m	1.4 10 ⁻⁵ m/s (74 l/min à 0.24 MPa)	66.5	5.3 10 ⁻⁵ m/s (85 l/min à 0.12 MPa)	2.2 10 ⁻⁵ m/s (61 l/min à 0.12 MPa)	
14	15 m			7.3 10 ⁻⁶ m/s (57 l/min à 0.62 MPa)	5.6 10 ⁻⁵ m/s (90 l/min à 0.12 MPa)	
16 m	17 m	1.8 10 ⁻⁴ m/s (96 l/min à 0.04 MPa)	73			
17.5 m	18.4 m	1.9 10 ⁻⁵ m/s (59 l/min à 0.24 MPa)	96			
20.4 m	21.4	3.5 10 ⁻⁵ m/s (débouillage progressif ?)	27			
27 m	28 m	1.6 10 ⁻⁴ m/s (83 l/min à 0.04 MPa)	76			

La perméabilité de la fondation est élevée (1 à 6.10⁻⁵ m/s) quelle que soit la profondeur de la cavité testée et la localisation de l'essai par rapport au barrage (rive gauche, partie centrale...) avec des perméabilités de 10⁻⁴ trouvée en partie superficielle jusqu'à 10 m. Les perméabilités testées coté rive gauche (SD1) sont élevées également, mais sensiblement moins (3.10⁻⁵ m/s à 7,3.10⁻⁶ m/).

Dans le SC3, on note que les résultats des essais de perméabilité ne sont pas forcément corrélés avec les RQD ni la description lithologique sur les logs de carottage : on a en effet des perméabilités assez fortes (10⁻⁴ - 10⁻⁵ m/s) dans des zones où les RQD sont pourtant élevés où la description précise que le grès est peu fracturé, et à l'inverse, des perméabilités de 10⁻⁵ m/s dans des zones décrites comme étant très fracturées.

Tableau 3 - Caractéristiques des enrochements trouvées par Hydrogéotechnique

Grandeur	Enrochement (couche 10)	Remarque
Profondeur sous l'axe du barrage	17.10 à 20.30 m	
Profondeur en pied de barrage	4.40 à 5.86 m sous la TV	
PI*(MPa)	1.11 à 1.29 moyenne = 1.20 MPa	
Em (MPa)	11.9 à 34 Moyenne = 17.6 MPa	
Perméabilité k(m/s)	>1.69 à 6.38 x10 ⁻³ m/s	Pas de montée en pression Lugeon et Lefranc → essai dans poche d'essai calibrée

3.4.2. Maçonnerie (couche 20)

Les caractéristiques géotechniques de la maçonnerie déterminées lors de la campagne géotechnique sont les suivantes :

Tableau 4 - Caractéristiques de la maçonnerie trouvées par Hydrogéotechnique

Grandeur	Maçonnerie (couche 20)	Remarque
Profondeur sous l'axe du barrage	18.20 à 27.10 m (SC101) 20.33 à 26.25 m (SC102)	
Epaisseur sous l'axe du barrage	8.9 m à 5.9 m	
RQD	0 ≤ RQD ≤ 92 Moyenne = 45%	Qualité globale du massif moyenne Ouverture de fracture possible lors de la réalisation des sondages
ps (t/m ³)	2.74 < ps < 2.79 t/m ³	
pd (t/m ³)	1.45 < pd < 1.99 t/m ³	
ph (t/m ³)	1.72 < ph < 2.00 t/m ³	
porosité	0.27 < n < 0.47	
Essai Franklin Is,50 (MPa)	0.804 < Is,50 < 1.416 Moyenne 1.037	
Rc (MPa)	6.2 < Rc < 23.8 Moyenne 12.7	Faible résistance à la compression uniaxiale
Module d'Young E (MPa)	4 371 < E < 10879	
Coefficient de Poisson v	0.06 < v < 0.21	
Perméabilité k(m/s)	2.63 x10 ⁻⁶ m/s (Nasberg) >5.31 x10 ⁻³ m/s (zone fracturée)	Lugeon : claquage survenu au pallier 0.6 à 0.8 MPa → essai dans poche d'essai calibrée

Il s'agit de blocs de grès gris rose à jaune cimentés par du béton.

3.4.3. Alluvions

Elles consistent en sables plus ou moins limoneux brun beige à blocs de grès (couche 30) et ponctuellement en alluvions anciennes de graviers et galets siliceux à matrice sableuse (couche 31)

Tableau 5 - Caractéristiques des alluvions trouvées par Hydrogéotechnique

Grandeur	Sables limoneux (couche 30)	Graviers et galets (couche 31)	Remarques
Profondeur	Sous la TV jusqu'à 2.95 m	De 2.95 m à 5.5 m	
Epaisseur	2.75 m	2.55	
Perméabilité k(m/s)	1.76×10^{-6} m/s (Lefranc)	1.96×10^{-7} m/s (Lefranc)	Perméabilités faibles

3.4.4. Substratum gréseux

Le terrain naturel gréseux, situé sous le barrage ou sous les alluvions, est rencontré sous la forme de grès massif (couche 40) et ses différents niveaux d'altération jusqu'au sable (couche 43). La couche 44 correspond aux lentilles d'argile.

Le grès sain (couche 40) est de teinte globalement pâle, dans les tons gris, beige, jaune à orangé, plus ou moins fracturé selon les sondages et les profondeurs, et pouvant présenter une légère altération au niveau des joints, témoignant de la présence de circulations d'eau au niveau de ces fractures.

Les caractéristiques géotechniques du substratum gréseux sain déterminées lors de la campagne géotechnique sont les suivantes :

Tableau 6 - Caractéristiques du substratum gréseux massif trouvées par Hydrogéotechnique

Grandeur	Grès (couche 40)	Remarque
Profondeur sous l'axe du barrage	27 m sous SC102	
RQD	$0 \leq RQD \leq 79$ Moyenne = 37%	Qualité globale du massif moyenne Ouverture de fracture possible lors de la réalisation des sondages
ρ_s (t/m³)	$2.76 < \rho_s < 2.88$ t/m ³	
ρ_d (t/m³)	$1.88 < \rho_d < 2.04$ t/m ³	
ρ_h (t/m³)	$2.06 < \rho_h < 2.24$ t/m ³	
porosité	$0.24 < n < 0.35$	
Rc (MPa)	$18.8 < R_c < 34.3$ Moyenne 27.4	Faible résistance à la compression uniaxiale
Module d'Young E (MPa)	$7\,938 < E < 10\,062$	
Coefficient de Poisson ν	$0.08 < \nu < 0.17$	
Perméabilité k(m/s)	9×10^{-7} m/s (Lefranc) LU = 2 (1 essai Lugeon) $> 4.51 \times 10^{-3}$ m/s (zone fracturée)	3 Lugeon : claquage survenu à 0.1, 0.2 et 0.4 MPa → essai dans poche d'essai calibrée

Les sables indurés (couche 41) sont des grès gris jaune beige très altérés, mais gardant une faible cohésion. Les échantillons extraits lors des sondages ont l'apparence du grès sain, mais se désagrègent à la main.

La couche 42 consiste en des cailloux et blocs de grès majoritaires dans une matrice sableuse.

Les sables gris jaunes (couche 43) correspondent à l'état d'altération le plus avancé du grès.

Les caractéristiques géotechniques de ces formations du substratum altéré déterminées lors de la campagne géotechnique sont les suivantes :

Tableau 7 - Caractéristiques du substratum gréseux altéré trouvées par Hydrogéotechnique

Grandeur	Sable induré (couche 41)	Cailloux et blocs à matrice sableuse (couche 42)	Sable gris jaune à cailloux gréseux (couche 43)		Argiles grise (couche 44)
Profondeur sous l'axe du barrage	27.1 m (SC101) 12.8 m (PR111)	26.25 m	27.2 m (SC101)		-
Epaisseur sous l'axe du barrage	> 2 à 3 m	0.4 – 1 m	> 2.8 m		Lentilles de 4 à 70 cm
Identification GTR	Sable type B5		B2	B5	A2
Dmax (mm)	1mm		40	1<Dmax<20	
VBs	0.54		0.22	0.54<vbs<0.56	
Limites d'Atterberg					38<Wl<44 6<Ip<18
Wnat (%)	15.3%		22.8	16<Wn<18.9	10.7<Wn<12.5
CaCO3 (%)					0.27
Triaxial CU+u	C' = 19 kPa Φ' = 33.2° Ccu = 15 kPa Φcu = 26.3°				C' = 3 kPa Φ' = 25.8° Ccu = 2 kPa Φcu = 12.4°
Triaxial UU					Cuu = 247 kPa Φuu = 30°
Cisaillement à la boite			C' = 0 Φ'pic=27.8° Φ'résiduel=27.7°	C' = 0 29°<Φ'pic<31.5° 29°<Φ'résiduel<30.1°	
Compressibilité œdomètre					e0 = 0.34 σ'p = 203 kPa Cs = 0.049 Cc = 0.101
Consolidation					52-208 kPa : Cv=64.2 x10 ⁻⁷ m ² /s 208-416 kPa : Cv=56 x10 ⁻⁷ m ² /s 416-832 kPa : Cv=52 x10 ⁻⁷ m ² /s
Perméabilité k(m/s)	LU - 0 (0.33 l/min à 0.8 MPa) colmatage à 1 MPa >5.28 x10 ⁻³ m/s	2 à 3 10 ⁻⁵ m/s (49 l/min à 0.1 MPa) claquage à 0.1 MPa	1.8 x10 ⁻⁶ m/s (Lefranc injection) 1.65 x10 ⁻⁶ m/s (Lefranc pompage)		

3.5. MISSION G2-AVP GEOTEC DE 2017

Cette campagne s'inscrit dans le cadre d'une mission G2-AVP au sens de la norme NF P94-500 en vue des présentes études d'Avant-projet.

Elle s'est appuyée sur la réalisation de :

- 6 sondages carottés SC1 à SC6 dont un a été équipé d'un piézomètre, avec réalisation d'essais Lugeon au droit de l'évacuateur
- Imageries de parois de forage sur les carottages précédents avec une analyse stéréoscopique,
- 4 essais Down-Hole dans les sondages carottés précédents,
- 8 essais de mesure de la résistance à la compression simple ;
- Des mesures de la densité ont également été réalisées sur des échantillons de sol en place prélevés en carottage à différentes profondeurs. La position des mesures de densité n'a pas été reportée, en effet les essais ont été réalisés sur des échantillons prélevés en sondage, mais leur position exacte n'est pas garantie.

L'implantation de ces sondages est présentée sur le plan GEO-03 et sur la figure ci-dessous :



Figure 5 - Implantation des sondages carottés GEOTEC

Ces investigations ont permis de caractériser plusieurs ensembles géotechniques regroupés dans les familles enrochements de barrage, maçonnerie de barrage, alluvions et substratum gréseux. Les résultats de ces investigations sont récapitulés ci-dessous :

3.5.1. Enrochements

Ils ont été recoupés au droit des sondages SC4 et SC6. Ils consistent en blocs de grès grossier beige/gris à verdâtre, parfois microconglomératique, avec de nombreuses lentilles argileuses vertes, reconnus jusqu'à 13.00 m de profondeur / TA. Au sein de cet horizon, on rencontre deux passages de grès grossier lie-de-vin à muscovites à 10.50 m et 11.70 m de profondeur.

Une estimation visuelle de la proportion de blocs et de vides a été réalisée. On obtient une valeur approximative de 30 à 35 % de vide ce qui est relativement élevé. Il convient par ailleurs d'être prudent, en effet cette estimation est basée sur une observation visuelle des inspections vidéo par comptage surfacique.

Ces enrochements présentent de toute évidence une porosité importante.

Les essais de compression simple réalisés en laboratoire donnent les résultats suivants :

Tableau 8 - Résultat des résistances à la compression uniaxiale dans les enrochements

Sondage	Profondeur (m)	Rc (MPa)
SC4	2.7 – 3	26.7
SC4	11 – 11.15	43.6
SC6	5.2 – 5.45	25.6

Les blocs de grès sont moyennement compacts (Rc moyen de 32 MPa).

Des mesures de la densité ont également été réalisées sur des échantillons de sol en place prélevés en carottage à différentes profondeurs. La position des mesures de densité n'a pas été reportée, en effet les essais ont été réalisés sur des échantillons prélevés en sondage, mais leur position exacte n'est pas garantie.

3.5.2. Maçonnerie

Elle a été recoupée au droit des sondages SC3 et SC5. Elle est constituée par des grès bariolés à nombreuses traces d'oxydation et de litages, contenant parfois de la muscovite. Ces éléments rocheux sont maintenus par un liant en béton, identifié au droit des sondages jusqu'à 4.50 m (SC5) et 12.80 m (SC3) de profondeur.

Dans la maçonnerie les RQD relevés sont très élevés avec une moyenne de 97 (de 87 à 100).

Les essais de compression simple réalisés en laboratoire donnent les résultats suivants :

Tableau 9 - Résultat des résistances à la compression uniaxiale dans la maçonnerie

Sondage	Profondeur (m)	Rc (MPa)
SC3	4.55 - 5	5.4
SC5	1.7 - 2	12.9

La maçonnerie est peu compacte d'après ces résultats (moyenne de 9.15 MPa).

La densité moyenne mesurée dans la maçonnerie est de 2.3 t/m³.

3.5.3. Remblais sableux

Des remblais de nature gréseuse sont rencontrés au droit du SC4, sous le barrage en enrochements, selon le séquençage suivant :

- Des horizons gréseux légèrement altérés, constitués de grès grossier voire de microconglomérat, beige/gris à nombreuses lentilles argileuses vertes et oxydes de fer, sont observés sur 1 m d'épaisseur.
- Des horizons gréseux altérés sont reconnus jusqu'à 21.60 m de profondeur. Malgré leur apparence de terrain en place, il semblerait, au vue de la géométrie du barrage et de la présence de béton en dessous, qu'il s'agisse de matériaux mis en remblai (base de l'ouvrage secondaire). Il s'agit d'autant plus vraisemblablement de remblais qu'ils surmontent une dalle de béton, identifiée sur 70 cm d'épaisseur entre 21.60 et 22.30 m de profondeur. Il peut s'agit d'un ancien niveau de béton correspondant à l'ouvrage d'origine en maçonnerie recouvert par la suite par l'ouvrage en enrochement.

3.5.4. Substratum gréseux

Le substratum gréseux a été reconnu au droit des sondages SC1 et SC2, sous le radier maçonné du chenal de l'évacuateur, sous le barrage maçonné dans les sondages SC3 et SC5 et sous le barrage en enrochement dans les sondages SC4 et SC6.

A. Secteur de l'évacuateur (Rive droite)

Dans SC1, c'est d'abord le toit altéré beige/brun sur une épaisseur de 1.7 m qui surmonte le grès sain présentant le profil suivant dans les sondages SC1 et SC2 :

- Un grès à muscovite beige/brun présentant de nombreux litages et traces d'oxydation, identifié jusqu'à 7.55 m (SC1) et 11m (SC2) de profondeur. De rares niveaux argileux rougeâtres peuvent y être rencontrés ;
- Un grès fin lie-de-vin reconnu jusqu'à 9.30 m de profondeur dans SC1 ;
- Un grès beige/brun à nombreux litages et traces d'oxydation ocres, observé jusqu'à 14.30 m de profondeur dans SC1. De nombreux niveaux de grès altérés brun à lentilles et passées argileuses vertes sont présents. Dans SC2 ce niveau apparaît comme un grès grossier marron à nombreuses petites lentilles et niveaux argileux verts jusqu'à 15 m de profondeur ;
- Un grès fin gris/beige devenant plus grossier en profondeur, à nombreux litages et niveaux argileux verts, identifié jusqu'à 21.00 m (SC1) et 20.8 m (SC2) de profondeur, arrêt des sondages.

Les RQD avoisinent les 100% (valeur mini 80%).

Les essais d'eau LUGEON réalisés au droit de SC1 et SC2 donnent les résultats suivants :

Tableau 10 - Résultats des essais Lugeon (SC1 et SC2)

Sondages	SC1				SC2			
Profondeur (m)	2 - 3	5 - 6	6.5 - 7.5	14 - 15	2 - 3	4 - 5	7 - 8	11 - 12
L (m)	1.00							
UI	49.6	50.4	50.3	48.5	50.1	52.2	51.2	50.1
Q1 (l/min)	49.60	50.40	50.30	48.50	50.10	52.20	51.20	50.10
Claquage (MPa)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	-	0.5	0.3
K (m/s)	7.10^{-6}	8.10^{-6}	8.10^{-6}	7.10^{-6}	8.10^{-6}	8.10^{-6}	8.10^{-6}	8.10^{-6}

Les essais n'ont pu être menés jusqu'à 10 bars du fait de la valeur du débit max de la pompe servant à l'injection (facteur limitant).

D'une manière générale, les essais Lugeon mettent en évidence un débouillage ou une ouverture des fissures avec l'augmentation de la pression. On note des débits plus importants à pression égale pour les paliers descendants par rapport aux paliers montants.

Aucun colmatage n'a été mis en évidence lors de la réalisation des essais. On note en revanche pour la majorité des essais un claquage de la roche pour des pressions comprises entre 0.3 et 0.5 MPa, avec une augmentation soudaine du débit pour une faible augmentation de la pression d'injection.

L'observation des carottes prélevées en sondage ne met pas en évidence une fracturation importante, en effet, les RQD calculés dans les sondages SC1 et SC2 sont proches de 100 %. Il est donc possible qu'une part non négligeable de la perméabilité mesurée provienne de la porosité propre du grès.

Les valeurs de perméabilité extrapolées restent faibles à moyennes (10^{-5} à 10^{-6} m/s).

B. Sous le barrage en maçonnerie (centre et rive gauche du barrage)

Au droit du toit du barrage en maçonnerie (SC3 et SC5), on rencontre le grès à muscovites bariolé, à nombreuses traces d'oxydation et litages, jusqu'à 18.00 m de profondeur (SC5) et jusqu'à la profondeur d'arrêt du sondage SC3 (21.00m). Au droit du sondage SC5, il est relayé par un grès à muscovites beige/gris à nombreuses traces d'oxydation et litages, avec des niveaux riches en végétaux fossiles, jusqu'à 21.00 m de profondeur.

Les RQD sont compris entre 34 et 100 dans le SC3 et 80 et 100 dans le SC5, la moyenne étant de 87.

C. Sous la digue en enrochements (centre et rive gauche du barrage)

Au droit du SC6, sous les enrochements du barrage, on retrouve :

- Le grès à muscovites beige/gris/jaune parfois rosâtre, identifié jusqu'à 8.00 m de profondeur
- Un grès lie-de-vin, riche en muscovites, à niveaux argileux lie de vin/verdâtre, reconnu jusqu'à 9.10 m d'épaisseur.
- Un grès fin bariolé beige/gris/ocre, riche en muscovites, à nombreuses traces d'oxydation et litages, identifié jusqu'à 15.00 m de profondeur.
- Un grès fin bariolé beige/gris/ocre/vert, riche en muscovites, à nombreuses traces d'oxydation et litages, avec des passages riches en végétaux fossiles et de nombreux joints et niveaux argileux verdâtres, reconnu jusqu'à 30.00 m de profondeur.

Les RQD sont compris entre 30 et 100, la moyenne étant de 77.

Au droit au SC4, une particularité apparaît car ce sondage semble être implanté au droit de la faille de Renauvoid. En effet, contrairement aux autres sondages le grès est très altéré jusqu'à 29.00 m de profondeur, arrêt du sondage. En carottage, les matériaux se présentent sous la forme d'un sable, et sont très différents des terrains gréseux compacts mis en évidence au droit des sondages réalisés de part et d'autre (le sondage SC3 réalisé sur le même profil ne met pas en évidence ces terrains sableux sous l'ouvrage en maçonnerie, mais directement du grès relativement compact).

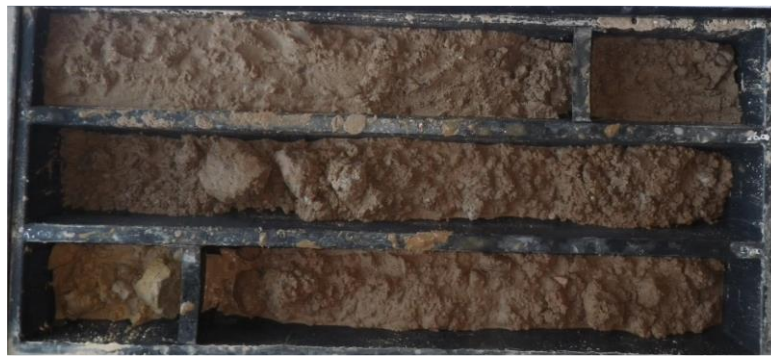


Figure 6 - Vue des matériaux sableux sous le barrage à hauteur du SC4 entre 24 et 27m

D'un point de vue structural, l'analyse effectuée dans les grès montre que :

- La majeure partie des discontinuités observées sont inclinées de moins de 30° par rapport à l'horizontale ;
- Il n'est pas possible d'identifier une ou des directions dominantes pour les discontinuités, à l'exception du forage SC3, où les plans de stratification, de foliations et de contacts semblent présenter une tendance en termes de direction de pendage.

D. Essais en laboratoire

Les essais de compression simple réalisés en laboratoire pour les grès de fondation donnent les résultats suivants :

Tableau 11 - Résultat des résistances à la compression uniaxiale dans le grès

Sondage	Profondeur (m)	Rc (MPa)
SC1	2.6 – 2.8	16.3
SC1	5 – 5.35	10.8
SC2	2.4 – 2.7	16.2
SC2	4 – 4.3	19.2
SC3	12.7 - 13	13.7
SC5	6.6 – 7	19.7
SC6	9.4 – 9.65	16.8

Le substratum gréseux est peu compact d'après ces résultats (Rc moyen = 16.1 MPa).

La densité moyenne mesurée dans les grès est de 2.025 t/m³ sous l'évacuateur de crue et de 1.989 t/m³ dans le secteur du barrage.

3.5.5. Niveaux d'eau relevés

Les niveaux d'eau suivants dans les sondages sont relevés en fin de campagne :

Tableau 12 - Niveau d'eau relevé dans les sondages en fin de campagne

Sondages	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6
Date relevé niveau d'eau	10/11/2016	08/11/2016	4/11/2016	23/11/2016	16/11/2016	21/11/2016
Cote tête sondage (NGF)	370.00	370.00	365.50	372.90	367.85	372.95
Prof. Niveau d'eau (en m)	5.50	3.00	1.50	17.00	6.50	17.20
Cote niveau d'eau (NGF)	364.50	367.00	364.00	355.90	361.35	355.75

Il s'agit de niveau d'eau non stabilisés, les sondages étant réalisés avec injection d'eau.

3.5.6. Essais down-hole

L'ensemble des résultats des essais DOWN-HOLE montre les résultats suivants :

- Les résultats des 4 essais sont homogènes en fonction des couches géologiques traversées ;
- Les enrochements présents au droit des forages SC4 et SC6 forment une couche dans laquelle la vitesse de propagation des ondes P et S est très faible ;
- La présence de maçonnerie en béton au niveau des forages SC3 et SC5 réduit la génération des ondes de cisaillement dans le sol ;

Dans un tel contexte, des essais Cross-Hole auraient permis d'obtenir des mesures plus fiables pour les terrains situés sous le barrage : en effet pour un tel essai, les terrains sus-jacents n'influencent pas la qualité des mesures sur les terrains plus en profondeur. Cette méthode générant des coûts de sondages supplémentaires, n'a pas été retenue.

Remarque : le scellement des tubes en PVC nécessaires à la mise en œuvre des essais down-hole n'a pu être réalisé correctement au droit des sondages SC4 et SC6 réalisés dans la partie en enrochement. En effet au vu de la porosité apparente très importante mise en évidence lors de la réalisation des inspections vidéo dans les sondages SC4 et SC6, l'utilisation d'une toupie de béton pour procéder aux scellements a été envisagée, les volumes attendus étant particulièrement importants. Une toupie de 6 m³ de béton a donc été amenée sur site. La totalité de la toupie a été vidée dans le sondage SC6 sans que le béton injecté ne suffise à sceller le tube. La porosité et la perméabilité de l'intérieur du barrage en enrochement est telle qu'il est en l'état impossible de procéder à un tel scellement (porosité estimée à 30 à 35 % environ). Par ailleurs, si on parvenait malgré tout à sceller les tubes en multipliant le volume injecté, les mesures qui seraient ensuite réalisées en Down Hole ne correspondraient plus aux caractéristiques du barrage dans son état actuel, mais à un ouvrage en enrochement injecté de béton, ce qui dans ces conditions n'aurait plus du tout de signification.

3.6. CAMPAGNE GEOTEC DE 2020

La campagne d'investigations géotechniques de septembre 2020 a pour objectif principal de déterminer la nature et l'épaisseur des différentes couches de sol et de rocher au droit des principaux ouvrages projetés. Dans la mesure où les caractéristiques géotechniques des sols avaient été testées et documentées à plusieurs reprises lors des campagnes précédentes, le choix du type de sondages s'est porté par souci d'économie sur des sondages destructifs avec essais pressiométriques.

Cette campagne s'inscrit dans le cadre d'une mission géotechnique de travaux de sondages (ex mission G0) au sens de la norme NF P94-500.

Elle a consisté en la réalisation de 7 sondages avec essais pressiométriques répartis au niveau des ouvrages suivants :

- Joints de dilatation du parement amont du barrage en maçonnerie (2020 – SP1 à SP3) ;
- Coursier et futur bassin de dissipation de l'évacuateur de crues (2020 – SP4 à SP6) ;
- Futur ouvrage de vidange et de dérivation du canal d'amenée (2020 – SP7).

En plus, trois sondages destructifs inclinés ont été réalisés à proximité des sondages pressiométriques de l'évacuateur de crues afin de déterminer l'épaisseur de la maçonnerie du coursier (2020 – SD4 à SD6).

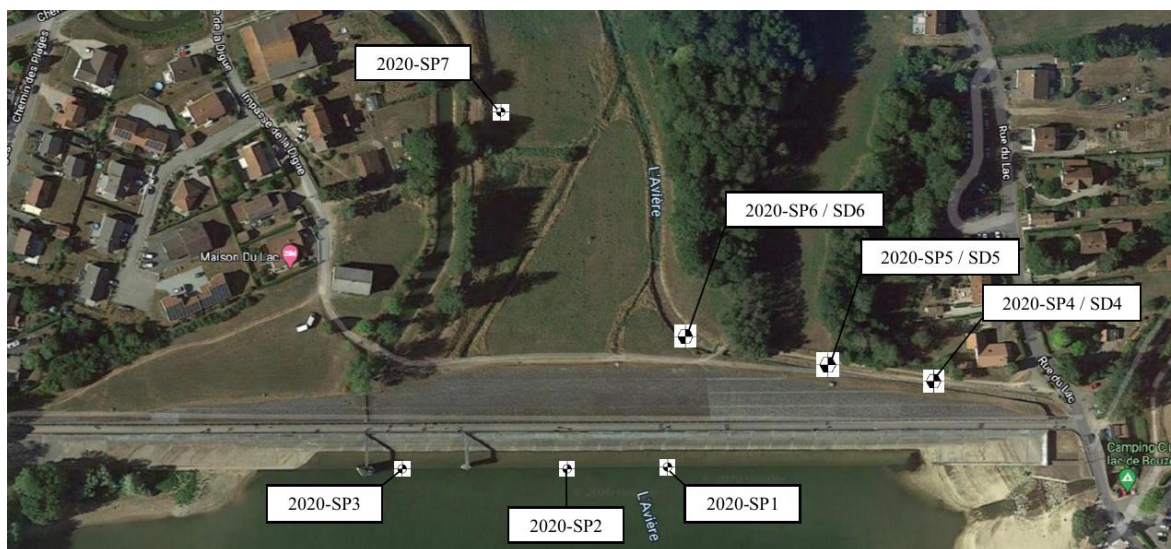


Figure 7 – Implantation des sondages de 2020

3.6.1. Caractérisation des sols en amont des joints de dilatation

Les trois sondages pressiométriques 2020 – SP1 à SP3 ont été réalisés en roto-percussion en diamètre 64mm. Ils ont été effectués dans la retenue depuis un balcon installé sur la crête du barrage en maçonnerie.

La campagne a mis en évidence les formations suivantes :

- Une **vase noirâtre**, observée au droit de l'ensemble des sondages, sur des épaisseurs entre 1.30 et 1.50 m. Il s'agit de dépôts sédimentaires consécutifs à la retenue ;
- Des **sables et graviers plus ou moins argileux**. Ils ont été reconnus au droit de l'ensemble des sondages jusqu'à des profondeurs variant entre 2.20 m et 4.00 m depuis le fond de la retenue. Les caractéristiques géomécaniques sont relativement faibles ;
- Une **argile grise**, mise en évidence de manière significative au droit des sondages SP1 et SP2 jusqu'à des profondeurs variant entre 5.40 m et 5.70 m depuis le fond de la retenue. Il s'agit du corroi d'argile mis en place

en 1889 pour recouvrir la fissure en pied amont du barrage. Ses caractéristiques géomécaniques sont très faibles ;

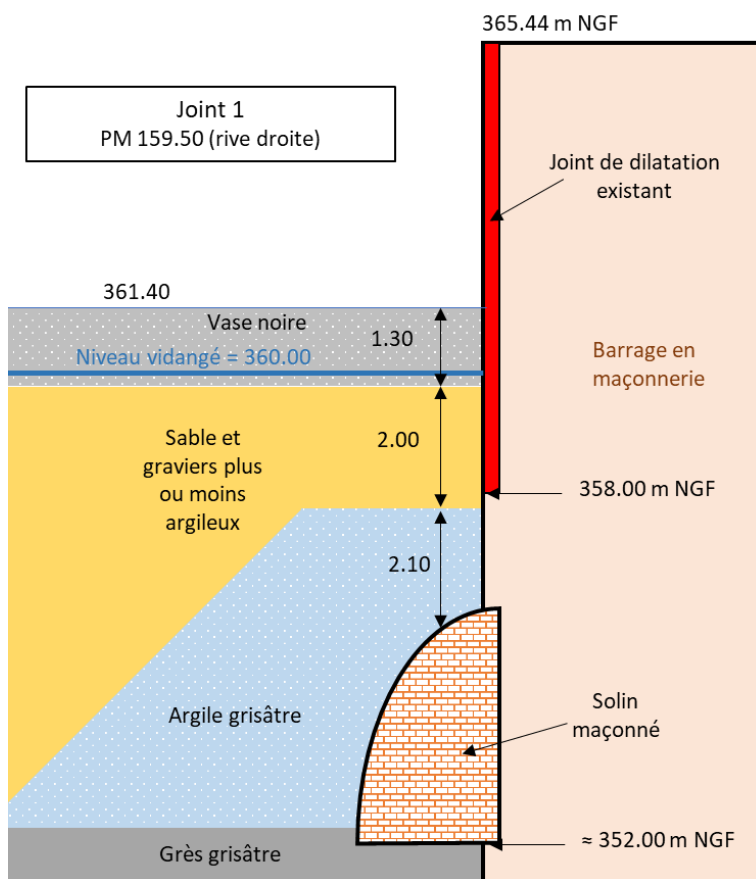
- Un **grès gris rougeâtre**, rencontré au droit de l'ensemble des sondages jusqu'à leur base, de caractéristiques géomécaniques élevées. Dans le rapport d'investigations, ce matériau est référencé comme correspondant au substratum local. Cependant, au droit des sondages SP1 et SP2, il correspond probablement au solin en maçonnerie mis en œuvre en 1889 en pied amont pour consolider la zone de la fissure de pied.

Les caractéristiques géomécaniques mesurées par essais pressiométriques sont synthétisées dans le tableau suivant.

Tableau 13 - Propriétés géomécaniques des formations pour les sondages 2020 – SP1 à SP3

Formation	Pression limite	Module pressiométrique
Vase noirâtre	$0.08 \leq p_l^* \leq 0.14$ MPa	$0.67 \leq E_M \leq 0.80$ MPa
Sables et graviers plus ou moins argileux	$0.50 \leq p_l^* \leq 0.87$ MPa	$2.68 \leq E_M \leq 6.88$ MPa
Argile grise	$0.29 \leq p_l^* \leq 0.51$ MPa	$2.30 \leq E_M \leq 4.42$ MPa
Grès gris rougeâtre / maçonnerie du solin	$2.90 \text{ MPa} \leq p_l^*$	$38.9 \leq E_M \leq 483$ MPa

D'une manière générale, les altitudes des couches relevées lors de la campagne de 2020 sont cohérentes avec les informations issues des plans d'archive. Les schémas ci-dessous en font une synthèse.



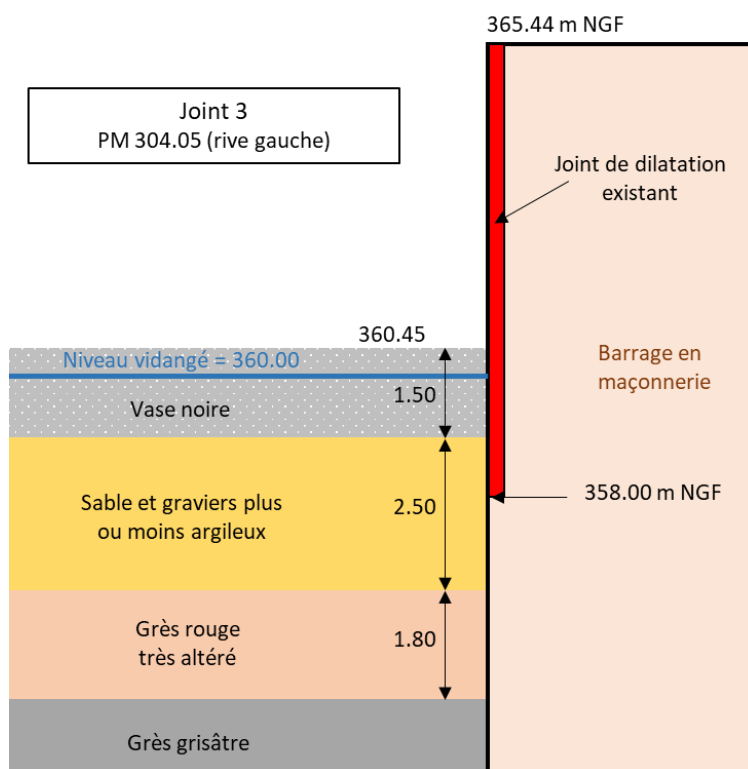
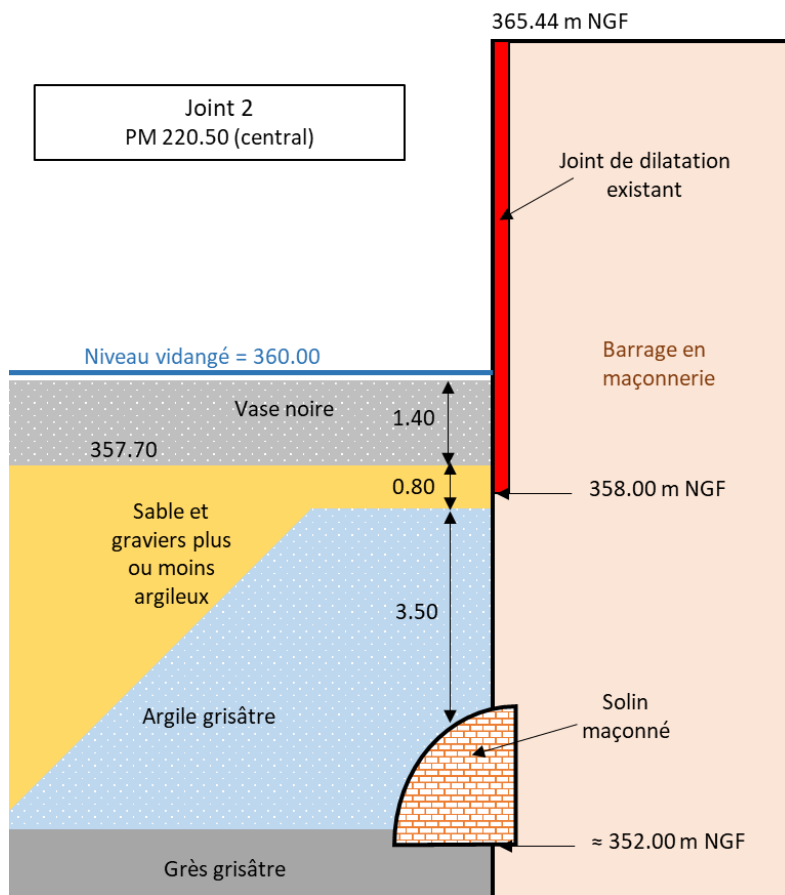


Figure 8 – Synthèse des informations disponibles issues des plans d'archive et de la campagne de 2020

3.6.2. Caractérisation des sols dans la zone du coursier et du bassin de dissipation (sondages 2020 – SP4 à SP6)

Sous une dizaine de centimètres de terre végétale, la campagne de reconnaissance a mis en évidence les formations suivantes :

- Une **argile plus ou moins chargée en sable, graviers et cailloux**, mise en évidence pour chacun des sondages à des profondeurs variant entre 1.30 m et 3.50 m par rapport au terrain naturel. En partie supérieure, il est vraisemblable que cet horizon s'apparente à des remblais. Les caractéristiques sont faibles à moyennes ;
- Un **grès brun grisâtre plus ou moins altéré**, rencontré pour chacun des sondages jusqu'à leur base, représentatif du substratum local. Les caractéristiques géomécaniques sont ponctuellement relativement moyennes (frange d'altération généralement en tête et passée altérée dans la masse de l'ordre de 1 à 2 mètres) à globalement élevées.

Les caractéristiques géomécaniques mesurées par essais pressiométriques sont synthétisées dans le tableau suivant.

Tableau 14 - Propriétés géomécaniques des formations pour les sondages 2020 – SP4 à SP6

Formation	Pression limite	Module pressiométrique
Argile plus ou moins chargée en sable, graviers et cailloux	$0.61 \leq p_l^* \leq 1.43 \text{ MPa}$	$3.13 \leq E_M \leq 9.51 \text{ MPa}$
Grès altéré brun grisâtre	$1.88 \text{ MPa} \leq p_l^*$	$10.3 \leq E_M \leq 310 \text{ MPa}$

Les sondages destructifs inclinés réalisés pour déterminer l'épaisseur de la maçonnerie des radiers des ouvrages existants mettent en évidence des épaisseurs hétérogènes, variant sensiblement entre 0.20 et 0.55 m.

3.6.3. Caractérisation des sols dans la zone de l'ouvrage de vidange et de dérivation du canal d'amenée (sondage 2020 – SP7)

Sous une vingtaine de centimètres de terre végétale, la campagne de reconnaissance a mis en évidence les formations suivantes :

- Une **argile brun orangé**, observée jusqu'à 2 mètres de profondeur par rapport au terrain naturel, de faibles caractéristiques géomécaniques
- Un **grès très altéré** se présentant sous la forme d'une argile grésifiée, reconnu jusqu'à une profondeur de 7 m par rapport au terrain naturel. Ses caractéristiques géomécaniques sont particulièrement hétérogènes, moyennes à très élevées ;
- Un **grès plus ou moins altéré**, rencontré jusqu'à la base des sondages, de caractéristiques mécaniques élevées.

Les caractéristiques géomécaniques mesurées par essais pressiométriques sont synthétisées dans le tableau suivant.

Tableau 15 – Propriétés géomécaniques des formations pour les sondages 2020 – SP7

Formation	Pression limite	Module pressiométrique
Argile brun orangé	$p_l^* = 0.60 \text{ MPa}$ (un essai)	$E_M = 5.11 \text{ MPa}$ (un essai)
Grès très altéré	$0.61 \leq p_l^* \leq 1.43 \text{ MPa}$	$5.23 \leq E_M \leq 92.0 \text{ MPa}$
Grès plus ou moins altéré	$3.51 \text{ MPa} \leq p_l^*$	$40.9 \leq E_M \leq 364 \text{ MPa}$

3.7. SYNTHESE

Les résultats de la campagne Hydrogéotechnique de 2012 et ceux de la campagne GEOTEC de 2016 se complètent dans la mesure où la campagne GEOTEC a permis de bien caractériser le substratum gréseux (RQD, résistances à la compression) tandis que la campagne Hydrogéotechnique a caractérisé le substratum gréseux du point de vue des essais mécaniques (essais pressiométriques notamment)

La caractérisation des enrochements est plus difficile, notamment à cause de leur blocométrie et de leur nature poreuse et hétérogène. La maçonnerie quant à elle donne des résultats assez homogènes suivant les campagnes.

La difficulté principale tient dans la mise en place d'un modèle géotechnique pour la fondation du barrage :

Il apparaît sur le profil longitudinal du barrage de Bouzey de 1885 que le fond de fouille a été creusé dans le rocher gréseux compact (l'équivalent du rocher sain dans notre modèle). De toute évidence, celui-ci s'est mué au cours des événements (déplacement du barrage, rupture) et du temps (érosion progressive) en grès altéré voire en sables, dans lequel il peut subsister des niveaux indurés et des blocs gréseux. Ces transformations sont plus particulièrement observées au contact avec le barrage, avec l'apparition de niveaux sableux voire argileux sur des épaisseurs variables. De plus, la zone de faille cartographiée autour du PM 100 (et du PM 80 au PM 90 dans le profil longitudinal de 1885) constitue de toute évidence une zone privilégiée de filtration amont-aval et d'écoulement souterrain à partir de laquelle la dégradation progressive du grès sain environnant peut s'accélérer.

L'hétérogénéité des formations ainsi que la difficulté d'établir des limites entre couches (entre sable, grès altéré et grès sain notamment, et parfois sable en place et sable issu de la désintégration des enrochements ou du grès) rend donc fastidieux l'exercice d'une décomposition de la fondation en autant de couches, et pas toujours pertinent pour les problématiques de l'ingénierie de la réhabilitation.

3.8. MODELE GEOTECHNIQUE

Les différents aspects précédemment évoqués ont conduit à retenir pour le projet de réhabilitation du barrage de Bouzey un modèle géotechnique simplifié avec 5 formations principales :

- Maçonnerie ;
- Enrochements du barrage ;
- Sable (incluant la notion de grès très altéré, les poches médiocres sous la fondation et les sables alluvionnaires en place) ;
- Grès altérés (représentant des grès déjà dégradés, fracturés ou avec passages altérés) ;
- Grès sains (comportant des niveaux argileux).
- Ce modèle de fondation plausible et conservatif est présenté sur les plans GEO-04.

La compilation de l'ensemble des données géotechniques issues des différentes phases d'investigation nous amène à proposer les paramètres mécaniques suivants pour les formations composant le modèle géotechnique du barrage de Bouzey :

Tableau 16 - Propriétés statiques et dynamiques des formations

Propriété			Grès	Grès altéré	Sable	Maçonnerie	Enrochements
Masse volumique		ρ (kg/m ³)	2050	1900	1800	2200	1700
Propriétés statiques	Module d'Young	E (MPa)	8000	1000	20	7000	90
	Coefficient de Poisson	ν	0,25	0,32	0,35	0,28	0,3
Propriétés dynamiques	Module d'Young	E _{dyn} (MPa)	6000	1580	837	7700	390
	Module de cisaillement	G _{dyn} (MPa)	2400	600	310	3000	150
Cohésion		c' (kPa)	400	200	0	300	0
Angle de frottement interne		ϕ' (°)	37	35	32	43	42

Ces propriétés sont en particulier utilisées pour les calculs de stabilité du barrage.

Tableau 17 - Propriétés géomécaniques des formations

Propriété		Grès	Grès altéré	Sable	Maçonnerie	Enrochements
Célérité des ondes de cisaillement	C (m/s)	1050	700	500	1160	300
Résistance à la compression	R _c (MPa)	20	10	0,01	12	30
Résistance à la traction	R _t (MPa)	0.05	0	0	0.05	0
Q _s	kPa	500	400	70		
Estim. RMR		32-41	22		51	
Module pressiométrique	E _m (MPa)	250	50	10		35
Paramètre rhéologique α		0.5	0,67	0,33	0,33	0,25
Perméabilité (m/s)		10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	10 ⁻² - 10 ⁻³

Données de base

MAITRISE D'ŒUVRE RELATIVE A LA RESTAURATION DU BARRAGE DE BOUZEY

4. CLIMATOLOGIE

4.1. NEIGE

Selon la carte normative des valeurs de neige à prendre en compte en France métropolitaine (Eurocode 1 partie 1-3), le site du barrage est situé en zone B1. Le barrage étant à 271.5 m d'altitude, la charge de neige caractéristique est $S_k = 0.62 \text{ kN/m}^2$. La charge de neige exceptionnelle est $S_{Ad} = 1.07 \text{ kN/m}^2$.

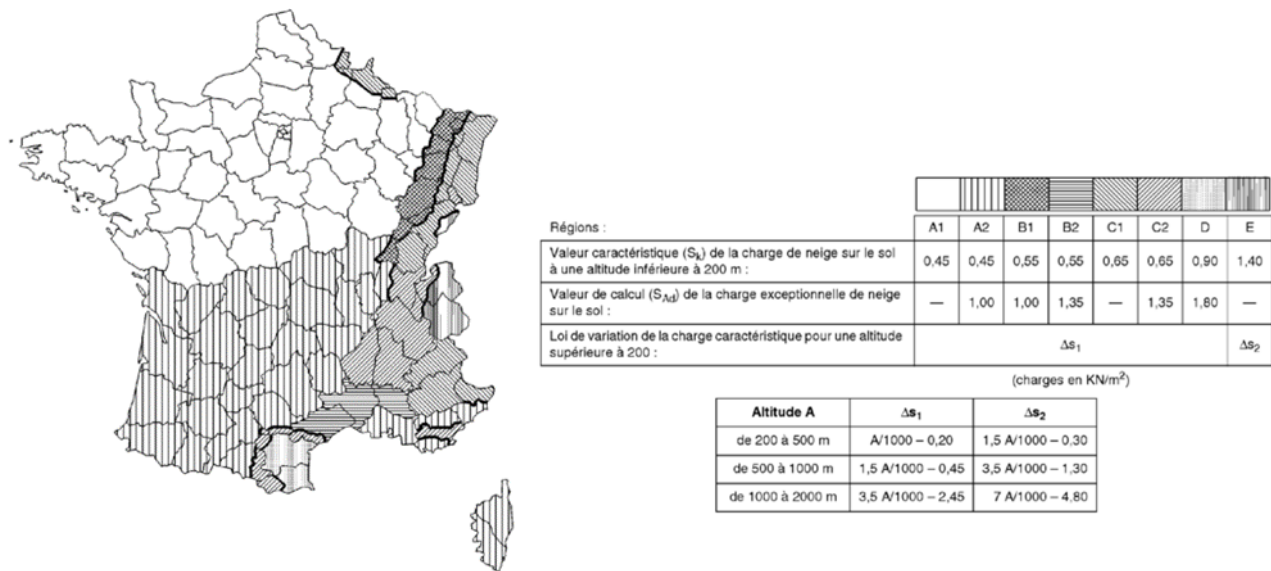


Figure 9 – Carte des valeurs de neige à prendre en compte en France métropolitaine

4.2. VENT

Suivant le zonage de l'Annexe Nationale de l'Eurocode 1 partie 1-4, le barrage des Galens est situé en région 2. La valeur de base de la vitesse de référence du vent est donc $v_{b,0} = 24 \text{ m/s}$.

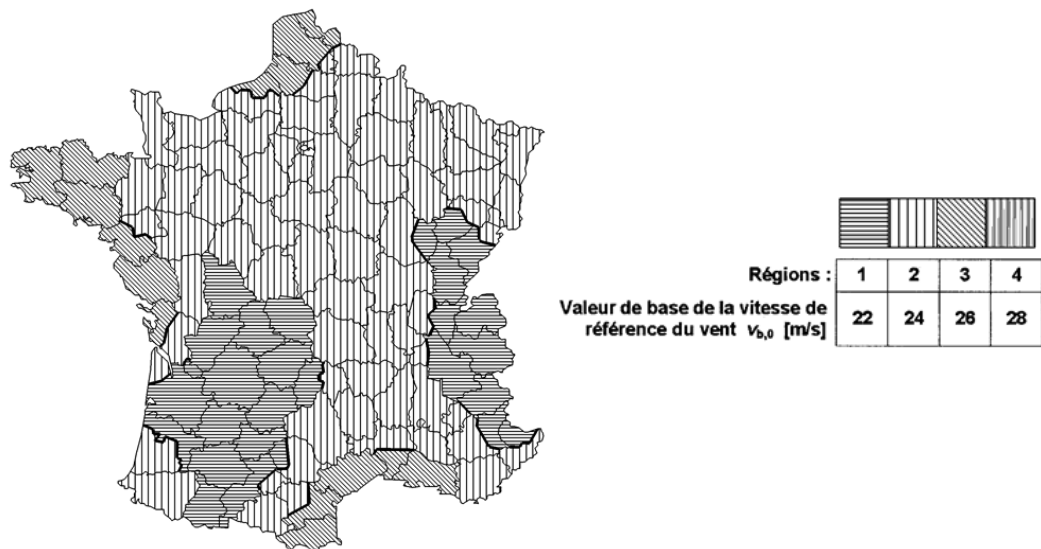


Figure 10 – Carte de la valeur de base de la vitesse de vent de référence en France

4.3. SEISME

Le barrage est situé en zone de sismicité modérée (zone 3), d'après le zonage sismique en vigueur depuis le 1er mai 2011.

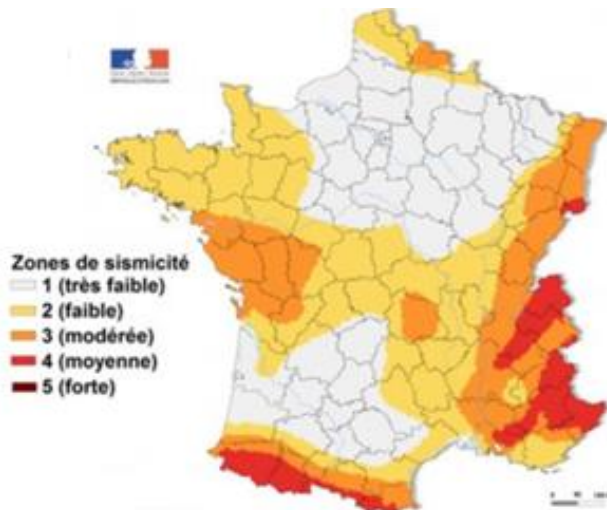


Figure 11 – Zonage sismique de France métropolitaine

Pour les barrages et leurs ouvrages annexes, les actions à prendre en compte ont fait l'objet d'une réflexion dans le cadre d'un groupe de travail adhoc (groupe « Barrages et séismes ») dont les conclusions provisoires ont été remises en novembre 2010 sous forme d'un rapport à la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL).

5. DONNEES HYDRAULIQUES

5.1. RESULTATS PRINCIPAUX DES ETUDES HYDROLOGIQUES ET HYDRAULIQUES

Des études hydrologiques et hydrauliques ont été réalisées pour caractériser le comportement hydraulique de l'évacuateur de crues projeté. Les résultats principaux sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 18 – Principaux résultats des études hydrologique et hydraulique

Crue (période de retour)	Volume de la crue (Mm³)	Débit de pointe entrant dans le réservoir (m³/s)	Débit de pointe sortant dans le réservoir, après écrêtement (m³/s)	Cote maximale atteinte dans le réservoir
2	0.953	6.6	3.8	371.75
10	1.484	12.3	7.3	.88
50	1.940	17.2	10.5	371.99
100	2.135	19.3	12.0	372.03
1000	3.056	29.2	18.8	372.22
3000	3.708	36.2	23.8	372.34
10 000	4.415	43.8	29.4	372.47
1.15 x 10000	5.013	50.2	34.2	372.57

Les études hydrologiques et hydrauliques pourront être fournies sur demande à l'Entrepreneur.

5.2. COTES DE RETENUE CARACTERISTIQUES

Conformément à l'arrêté ministériel du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages, pour des barrages existants en remblai de classe B tels que le barrage de Bouzey, l'évacuateur de crues est conçu pour évacuer une crue exceptionnelle de période de retour 3000 ans. Il s'agit de la crue amenant aux PHE.

Le dimensionnement de l'évacuateur de crues et la stabilité du barrage sont également justifiés pour un épisode de probabilité d'occurrence annuelle 3.10^{-5} , correspondant à une période de retour de 33 000 ans. Conformément aux recommandations du CFBR pour le dimensionnement des évacuateurs de crues, la crue de période de retour 33 000 ans est estimée en majorant la crue décennale par un coefficient multiplicateur sur les débits de 1.15.

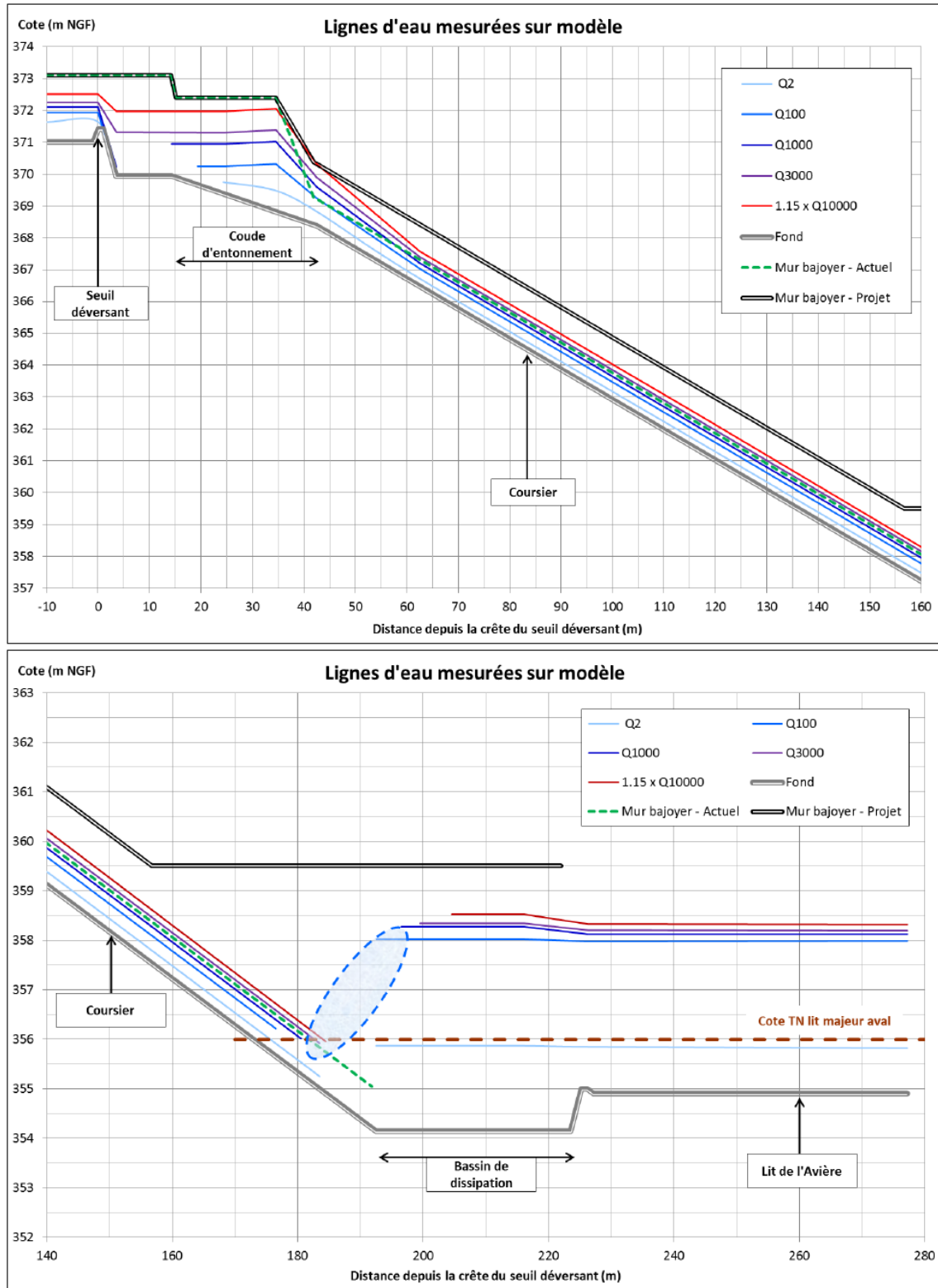
Les cotes de retenue caractéristiques après travaux sont les suivantes :

Tableau 19 – Cotes de retenue caractéristiques

Caractéristique	Cote de retenue
Niveau vidangé	360 m NGF
Cote d'exploitation maximale depuis avril 2019	368.70 m NGF
Cote de Retenue Normale (RN) après travaux	371.50 m NGF
Cote de Plus Hautes Eaux (PHE), correspondant au niveau d'eau atteint pour la crue de période de retour 3000 ans	372.34 m NGF
Cote de Plus Hautes Eaux Extrême (PHEE), correspondant au niveau d'eau atteint pour la crue de période de retour 33 000 ans	372.57 m NGF

5.3. NIVEAU D'EAU DANS L'EVACUATEUR DE CRUES PROJETE

Les lignes d'eau dans l'évacuateur de crues projeté ont été déterminées par un modèle physique. Les résultats graphiques sont présentés ci-dessous :



Le tableau suivant synthétise les niveaux d'eau obtenus en certains points caractéristiques, en fonction de la crue considérée.

Tableau 20 – Synthèse des débits et niveaux d'eau

	Q3000	1.15*Q10000
Niveau de retenue	372.34 m NGF (= PHE)	372.57 m NGF
Hauteur d'eau dans le coursier	0.93 m	1.10 m
Niveau d'eau maximum du ressaut hydraulique dans le bassin de dissipation	358.35 m NGF	358.53 m NGF
Niveau d'eau en aval du bassin de dissipation, en pied de barrage	358.19 m NGF	358.31 m NGF

5.4. VITESSES D'ÉCOULEMENT

Les vitesses d'écoulement dans l'évacuateur de crues ont été évaluées sur tout le linéaire par modèle numérique (graphique ci-dessous) et confirmées ponctuellement par modèle physique en laboratoire.

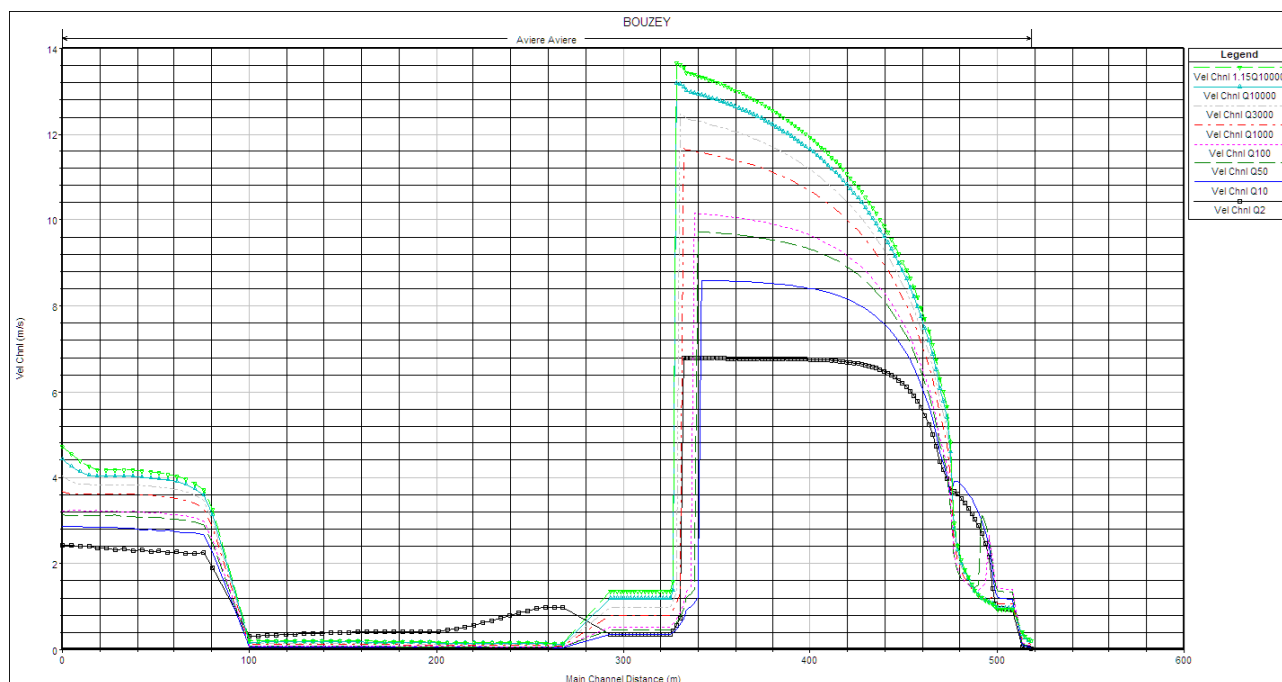


Figure 12 – Vitesses d'écoulement dans l'évacuateur de crue issues du modèle numérique

Les valeurs données par les modèles physique et numérique peuvent varier légèrement. Le tableau suivant donne les valeurs retenues en des points caractéristiques de l'évacuateur de crues :

Tableau 21 – Vitesses de l'écoulement sur l'évacuateur de crues en situation de crues Q3000 et 1,5*Q10000

Localisation	Modèle	Crue débit Q3000	Crue débit 1,5*Q10000
Fin de la boîte déversante	Physique	-	-
	Numérique	1 m/s	1 m/s
	Valeur retenue	1,5 m/s	1,5 m/s
Fin du coude et convergent (entrée du coursier)	Physique	5,85 m/s	6,0 m/s
	Numérique	3,6 m/s	3,6 m/s
	Valeur retenue	5,85 m/s	6,0 m/s
Fin du coursier	Physique	> 7,5 m/s	> 7,5 m/s
	Numérique	12,5 m/s	13,8 m/s
	Valeur retenue	12,5 m/s	13,8 m/s
Bassin de dissipation	Physique	> 7,5 m/s	> 7,5 m/s
	Numérique	12,5 m/s	13,8 m/s
	Valeur retenue	12,5 m/s	13,8 m/s