



Photo 39



Photo 40

SC1 de 9.4 à 15.2m

9.4m



10m



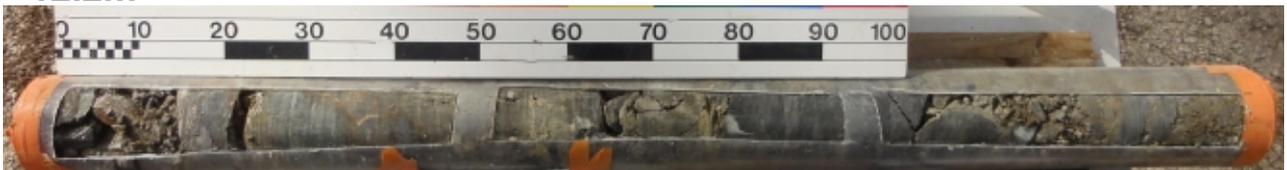
10m

11.2m



11.2m

12.2m



12.2m

13.6m



13.6m

14.7m



14.7m

15.2m

C-3. CARACTERISTIQUES MECANQUES DE LA FONDATION : ESSAIS SUR LE SITE ET EN LABORATOIRE

3.1 PROGRAMME DE RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES DE LA REVISION SPECIALE

ISL a rédigé avec l'assistance de l'AMO (EDF CIH) le cahier des charges d'un marché à bon de commandes pour la réalisation de reconnaissances géotechniques sur le barrage. Après consultation, le marché a été attribué à Ginger CEBTP, Agence de Jacou dans l'Hérault. Le rapport de reconnaissance fait l'objet du **document annexe n°5**.

Il a été choisi de phaser les reconnaissances. Une première campagne de reconnaissance in-situ a été réalisée en octobre 2012. Une seconde campagne a été réalisée en avril 2013.

Une série d'essais de laboratoire a été proposée sur les prélèvements à partir du résultat des reconnaissances in-situ.

Le plan d'implantation des reconnaissances est présenté sur le plan 10-07. La synthèse des reconnaissances est reportée sur une coupe du barrage sur le plan 10-08.

Le programme de reconnaissance **in-situ de phase 1** comprenait :

- quatre sondages carottés de 15 à 20 m de profondeur doublés par des sondages destructifs dans lesquels ont été réalisés des essais (Lugeon et pressiomètre),
- une tranchée test à la pelle d'environ 2 m de profondeur sur la risberme à la cote 245 m NGF.

Tableau 3 : Essais dans les sondages carottés

Essais	Localisation	Profondeur	Diamètre	Essais
SC1/SD1	Crête	20 m	146 mm/66 mm	4 essais pressiométriques normaux 9 essais pressiométriques cycliques
SC2/SD2	Risberme à 245 m NGF	20 m	146 mm/66 mm	4 essais pressiométriques normaux 9 essais pressiométriques cycliques
SC3/SD3	Risberme à 235 m NGF	15 m	146 mm/66 mm	2 essais pressiométriques normaux 4 essais pressiométriques cycliques
SC4/SD4	30 m en aval du barrage	15 m	146 mm/116 mm	4 essais Lugeon

La tranchée à la pelle et les sondages SC1/SD1 à SC3/SD3 avaient pour objet de qualifier les caractéristiques du remblai.

Le sondage SC4/SD4 a été réalisé le plus en aval possible afin de qualifier la fondation dans la zone de dissipation d'un éventuel évacuateur sur remblai.

Les sondages dans le corps du remblai ont été rebouchés avec une gravette 5/15 mm (SC1/SD1 à SC3/SD3). Pour les zones dans le substratum (SC3/SD3), un coulis de ciment a été mis en œuvre.

Les sondages en aval du barrage (SC4/SD4) ont été cimentés sur toute la hauteur.

Les reconnaissances **de phase 2** poursuivaient les objectifs suivants :

- mieux apprécier la densité des matériaux du barrage et sa variabilité,
- évaluer la position du toit du rocher sain en aval du barrage,
- mieux qualifier les blocs du remblai en vue d'un éventuel réemploi,
- prélever des matériaux en vue de réaliser des essais triaxiaux de grands diamètres.

Elles comprennent les investigations in-situ suivantes :

- une grande tranchée de reconnaissance dans le corps du barrage,
- deux profils amont/aval comprenant chacun 3 sondages destructifs visant à réaliser des mesures de densité sur toute la hauteur du remblai à l'aide d'une sonde de type FDS (FDS11 à FDS32),
- trois profils de type « sismique réfraction » en aval du barrage à réaliser pour partie dans l'eau au droit de la potentielle fosse d'érosion (PS1 à PS3),
- trois profils de type « onde sismique de surface MASW » sur les 3 risbermes pour apprécier l'homogénéité des caractéristiques du remblai et apprécier les modules de cisaillement (MASW1 à MASW3).

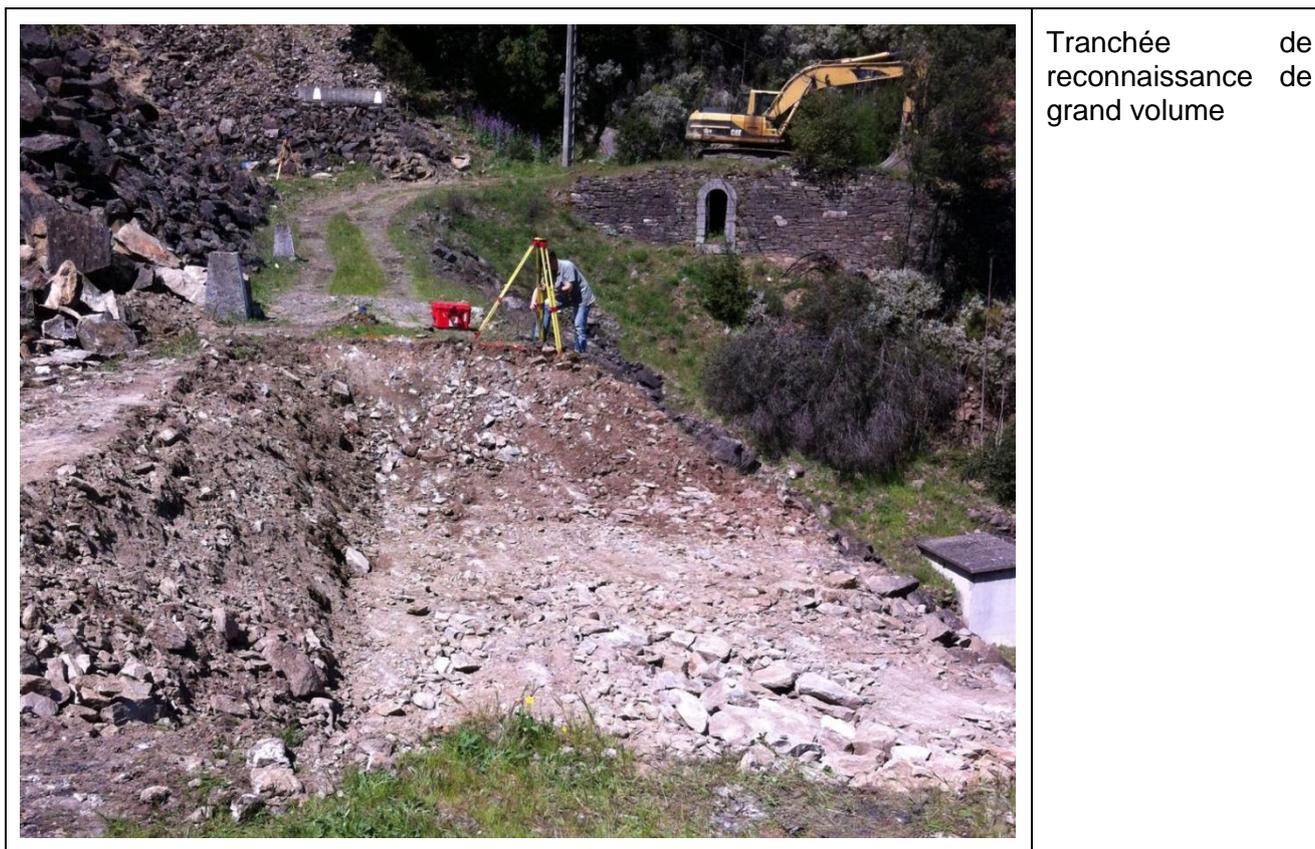
Par ailleurs, il a été demandé des mesures de densité complémentaires par pesée directe de tous les matériaux du remblai carottés dans leur gaine (environ 55 m de carottes) ainsi que des essais visant à caractériser la qualité des enrochements.

3.2 RESULTATS DES RECONNAISSANCES IN-SITU

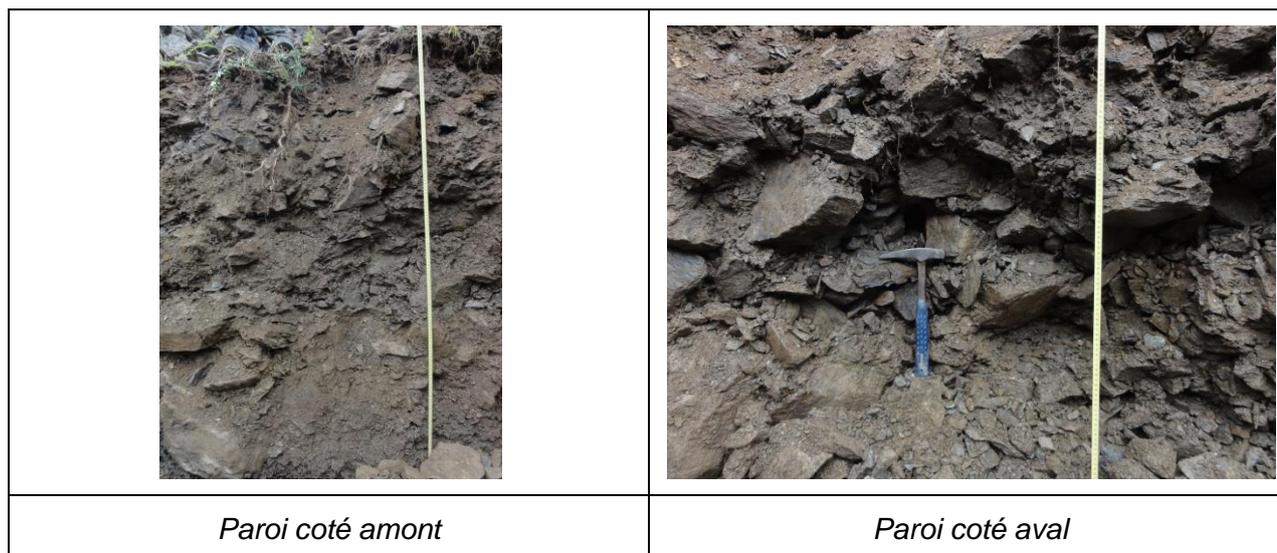
3.2.1 TRANCHEE DE RECONNAISSANCE

Dans un premier temps, une petite tranchée de reconnaissance a été réalisée sur la risberme à la cote 235 m NGF, seule risberme accessible par des engins de chantier. Elle a permis de visualiser les matériaux en s'affranchissant des effets éventuels des méthodes de prélèvement (lessivage pour les forages carottés). Cette tranchée a également permis à valider la faisabilité d'une tranchée de plus grand volume (tenue des parois, compacité, présence de gros blocs, représentativité...).

Dans un second temps, la tranchée de plus grand volume a ensuite été réalisée au même endroit. Elle a atteint une profondeur d'environ 2 m. La photographie suivante présente l'emprise de cette tranchée.



Un reportage photographique de cette opération a été réalisé et est joint au rapport de reconnaissances de sol. Les photographies suivantes illustrent les observations relevées pendant la tranchée.





Détail zone crue



Déblais



Détail matrice



Déblais

Le remblai apparaît comme un matériau 0/500 mm hétérogène alternativement ouvert (peu de matrice) ou fermé (riche en matrice).

Les blocs sont anguleux à émoussés. La fraction la plus fine (matrice et petits blocs) est dominante en surface. Les gros blocs sont davantage représentés en profondeur. Ce point est cohérent avec le sondage carotté voisin (SC3).

Au droit de cette tranchée, la matrice est composée de silts et de sables fins à grossiers.

3.2.2 RESULTAT DES SONDAGES DANS LE BARRAGE

Les sondages carottés ont été réalisés avec un diamètre intérieur de 130 mm (extérieur 146 mm). L'interprétation des carottes réalisés par ISL figure sur le plan 10-07.

Les faciès des logs sont très hétérogènes et un regroupement a été réalisé par ISL selon 3 catégories figurées dans le tableau suivant.

<p>Faciès avec blocs découpés > 100 mm (SC1 4,95-5,35)</p>	
<p>Faciès avec graviers et cailloux (2/100 mm) avec peu de matrice (SC2 19,10-19,60)</p>	
<p>Faciès riche en matrice fine (0/60 mm) (SC2 6,40-6,60)</p>	

Le taux de récupération (TCR) a été compris entre 93 et 95% pour les 3 forages avec cependant une incertitude sur un lessivage éventuel des fines du remblai.

Les longueurs relatives des différents matériaux au droit des sondages sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Longueur des matériaux dans les carottes

Longueur relative du type de matériau	SC1	SC2	SC3	Moyenne
Blocs découpés > 100 mm	42%	27%	46%	38%
Graviers et cailloux (2/100 mm) avec peu de matrice	26%	48%	41%	38%
Remblai riche en matrice fine (0/60 mm)	32%	25%	13%	23%

Les granulométries avant mise en œuvre présentent en moyenne une proportion de blocs supérieurs 100 mm de l'ordre de 50% en masse ce qui est cohérent les résultats des carottes (en supposant une densité de l'ordre de 2,6 pour les blocs et 2,0 pour le reste des matériaux) en considérant une légère fragmentation au compactage.

Localement, les carottes présentent des passées de matrice limono-argileuse. Ces matériaux n'ont pas été rencontrés dans la tranchée.

Des pertes totales d'eau ont été constatées de manière fréquente traduisant la forte perméabilité en grand du remblai

L'examen des carottes ne permet pas de mettre en évidence un quelconque zonage du barrage comme pourrait le laisser supposer la bibliographie (zone théorique 1 et 1bis) et il peut être considéré comme homogène en grand.

3.2.3 SUBSTRATUM

Sous le barrage, le substratum a été rencontré au droit des forages SC3 et SD3 aux cotes respectives de 221.75 m NGF et 223,0 m NGF soit des valeurs proches de la cote théorique selon le plan de fouille (222,5 m NGF).

Plus en aval, au droit de SC4 et SD4, le substratum sain a été rencontré aux cotes respectives de 221.20 m NGF et 222,0 m NGF. Ces valeurs sont cohérentes avec celles observées en SC4 et SD4 ainsi qu'avec la cote du fond de la fosse s'étant formée en sortie des galeries.

Le RQD varie entre 55 et 100% en SC4 et 40 à 80% en SC3.

Le rocher est qualifié de G2 (gneiss altéré sur fissure) à G1 (gneiss avec début d'altération dans la masse).

Le substratum en SD4 a fait l'objet de 4 essais Lugeons sur des hauteurs de 2 m. Les 3 premiers essais conduisent à des valeurs comprises entre 20 et 25 unités Lugeon. Le quatrième essai, plus en profondeur conduit à une valeur de 54 unités Lugeon. Cette plus forte valeur a été associée à une fissure notable observée sur SC4. Une interprétation par la méthode de Hously a conduit à conclure qu'il n'y avait eu ni claquage, ni débouillage marqué.

Un relevé de la fracturation a été effectué à l'aval du barrage ainsi que dans la galerie de drainage en rive gauche.

Les figures suivantes représentent la projection stéréographique des pôles de chaque diaclase relevée. L'axe du barrage est tracé en tirets bleu. Le plan noir correspond à la foliation moyenne (N30 28SE).

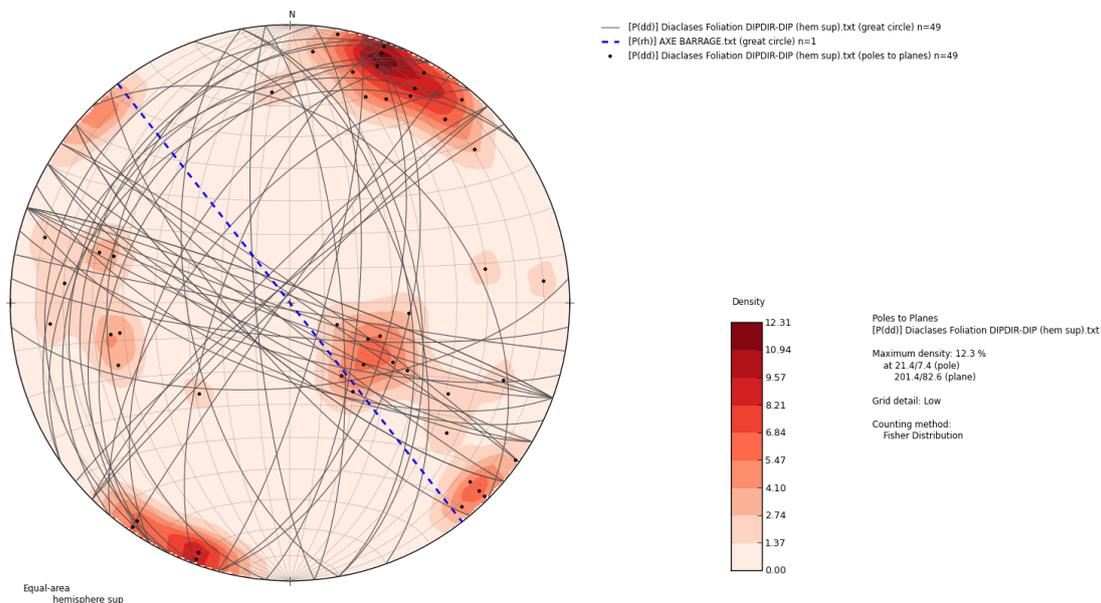


Figure 13 : Relevé structural (canevas de Schmidt – hémisphère supérieur)

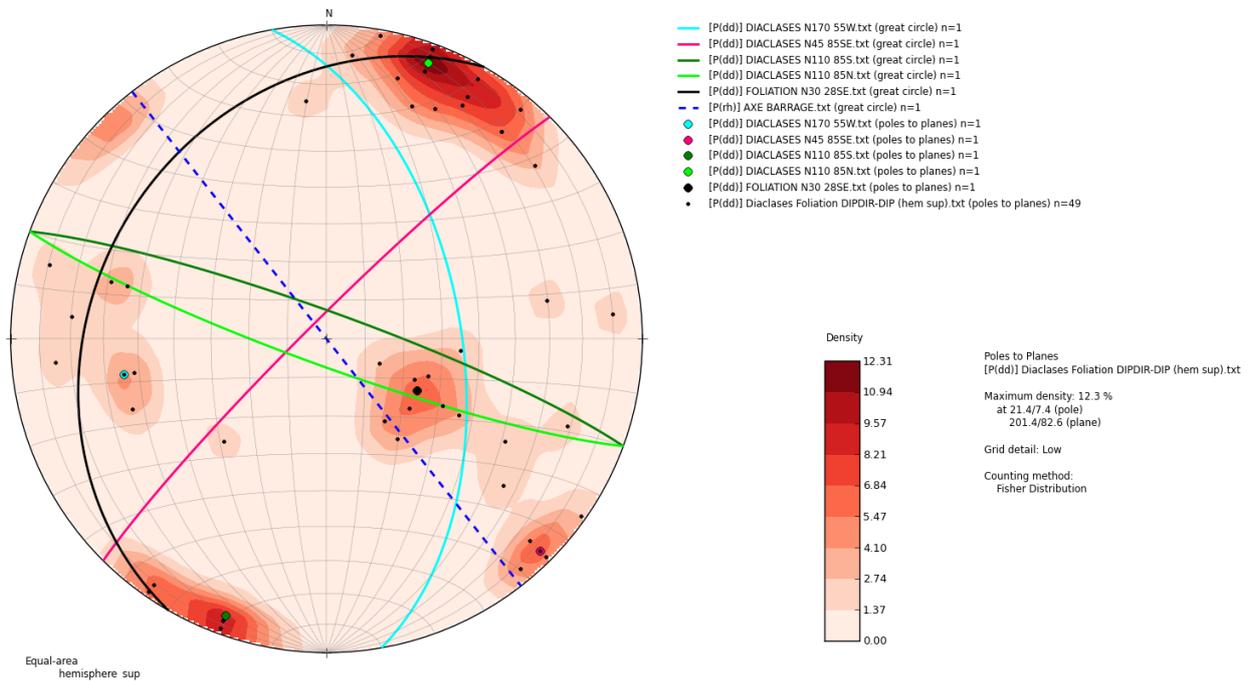


Figure 14 : Synthèse du relevé structural

Plusieurs familles de discontinuités ressortent :

- Famille 1, très bien exprimée (plans en vert clair et vert foncé), avec une orientation moyenne à N110 et un pendage moyen de 85° le plus souvent vers le Nord. Cette famille semble présenter une extension d'ordre décimétrique et un espacement compris entre 20 cm et 1 m. Les plans sont relativement lisses, parfois rubéfiés ou striés. Ces diaclases sont le plus souvent fermées, mais l'on observe localement des ouvertures millimétriques ;
- Famille 2 (plan en rose), avec une orientation moyenne à N45 et un pendage moyen vers le SE de 85°. Cette famille semble présenter une grande extension, d'ordre pluri-décimétrique. Les plans sont relativement lisses. Ces diaclases sont le plus souvent fermées. En galerie, une faille à enduit argileux de 1 à 2 cm d'épaisseur reprend cette même direction ;
- Famille 3 (plan en bleu ciel), avec une orientation moyenne à N170 et un pendage moyen vers l'Ouest de 55°. En galerie, des plans de cisaillement à enduit argileux d'épaisseur millimétrique reprennent cette même direction.

3.2.4 ALLUVIONS EN AVAL DU BARRAGE

SC4 et SD4 ont été réalisés à environ 30 m en aval du pied du barrage. Le substratum est recouvert d'un mètre de remblai puis d'une succession d'alluvions sablo-limoneux comprenant quelques blocs (éboulis de versant).

3.2.5 RESULTAT DES ESSAIS PRESSIOMETRIQUES

Deux types d'essai pressiométrique ont été réalisés dans le corps du barrage: des essais standards et des essais cycliques.

Les tableaux suivants présentent les résultats des essais. Les résultats des essais cycliques sont grisés.

Tableau 5 : Résultat des essais pressiométriques pour SD1

Cote (NGF)	Prof. (m)	Pf* (MPa)	PI* (MPa)	Em (MPa)	E/PI*	Commentaires
265.5	2	1.4	2.6	13	4.9	
264.5	3	0.69	1.0	13	12	
262.5	5	2.0	2.7	103	39	bloc ?
260.5	7	2.7	2.7	112	42	éclatement de la sonde à 3 MPa (bloc ?)
259.5	8	2.3	3.7	33	8.7	
258.7	8.8	1.1	1.9	15	7.9	
256.5	11	1.1	1.8	14	7.5	
255.5	12	1.7	2.3	14	6.2	
254.5	13	1.7	2.4	26	11	
252.5	15	1.5	1.9	16	8.5	
251.5	16	1.2	2.1	10	5.0	
250.0	17.5					prise de trou à volume trop important
248.5	19	2.2	3.3	32	9.7	

Tableau 6 : Résultat des essais pressiométriques pour SD2

Cote (NGF)	Prof. (m)	Pf* (MPa)	PI* (MPa)	Em (MPa)	E/PI*	Commentaires
243.7	1.5	3.3	4.6	80	18	frange compacte superficielle
242.2	3		6.1	365	60	bloc
240.2	5	1.5	2.6	19	7.4	
238.2	7	2.8	3.8	67	18	
237.4	7.8		2.3	30	13	
236.4	8.8	2.8	3.9	59	15	
234.2	11	0.71	1.3	17	13	
233.2	12	4.0	5.7	57	10	
232.4	12.8	0.82	1.3	13	9.7	
229.7	15.5		5.8	160	28	bloc
229.0	16.2	3.2	4.5	53	12	
228.2	17	2.4	3.3	55	17	
226.2	19	1.7	2.8	37	13	

Tableau 7 : Résultat des essais pressiométriques pour SD3

Cote (NGF)	Prof. (m)	Pf* (MPa)	PI* (MPa)	Em (MPa)	E/PI*	Commentaires
232.5	2	0.65	0.96	5	5.2	
231.5	3	1.5	2.7	34	13	
229.5	5	1.3	1.9	24	13	
228.5	6	1.1	1.7	7.3	4.4	
227.0	7.5	0.97	1.6	11	7.1	
225.5	9	2.5	3.7	44	12	

Les graphiques suivants présentent les résultats des essais en écartant une valeur correspondant à un essai probablement réalisé pour tout ou partie au sein d'un bloc.

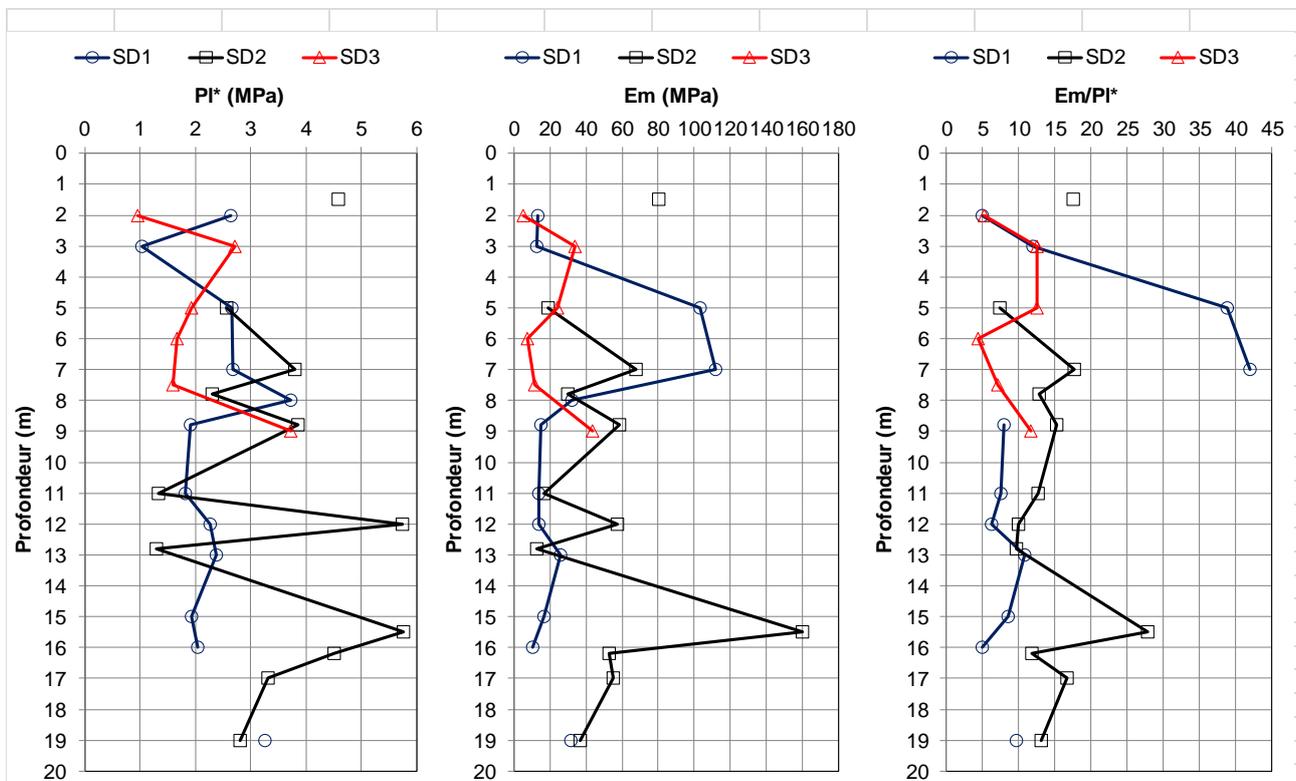


Figure 15 : Synthèse des essais pressiométriques

Les résultats sont les suivants :

- pressions limites (PI*) : entre 1 et 6 MPa (moyenne de 2,8 MPa)
- modules pressiométriques (Em) : entre 5 et 160 MPa (moyenne de 39 MPa)
- ratios Em/PI* : entre 5 à 42 (moyenne de 13)

La variabilité des valeurs obtenues est moins importante sur les 13 premiers mètres ce qui traduit probablement un compactage efficace, avec, pour ces horizons, une contrainte initiale de compactage supérieure à la contrainte actuelle de confinement.

Au-delà de 13 m, les résultats de SD2 montre une légère amélioration probablement liée à des contraintes de confinement (~ 350 kPa) supérieures à celles exercées initialement lors du compactage.

Les pressions limites correspondent à des graves moyennement compactes ($1 < PI^* < 2$) à compactes ($PI^* > 2,5$).

Les ratios Em/PI^* correspondent à des graves normalement serrées ($6 < Em/PI^* < 10$) à très serrées ($Em/PI^* > 10$). Le module est très variable à l'échelle métrique mais la valeur moyenne (environ 40 Mpa) est cohérente avec le matériau.

3.3 RESULTAT DES ESSAIS DE LABORATOIRE

3.3.1 GRANULOMETRIES

Le tableau suivant présente le résultat des granulométries réalisées en laboratoire sur la fraction 0/100 mm des échantillons de SC2.

Tableau 8 : granulométries de SC2

ESSAIS D'IDENTIFICATION			Teneur en eau W%	Granulométrie par tamisage				Masse volumique en t/m ³			
Sondages	Profondeurs	Description		% de passants sur fraction 0/50				ρ	ρ _d	S _r %	e
-	m	XP P94-011	NF P94-050	D _{max} (mm)	à 50mm	à 2mm	à 80μm				
SC2	3.7-4.9	GRAVES GROSSIERES	4.5%	120	61	10	1	1.81	1.73	22	0.36
SC2	6.1-7.3	GRAVES GROSSIERES	4.7%	120	48	20	4	2.13	2.03	39	0.25
SC2	7.3-8.0	GRAVES GROSSIERES	3.7%	120	54	19	6.0	2.03	1.96	26	0.27
SC2	15.3-16.6	GRAVES GROSSIERES	4.8%	120	51	17	5	2.09	2.02	27	0.25

Le tableau suivant présente le résultat des granulométries réalisées en laboratoire sur la fraction 0/100 mm des échantillons de SC1.

Tableau 9 : granulométries de SC1, SC2 et SC3

ESSAIS D'IDENTIFICATION			Teneur en eau	Granulométrie par tamisage				Masse volumique en t/m3			
Sondages	Profondeurs	Description		W%	% de passants sur fraction 0/50				ρ	ρ d	Sr%
-	m	XP P94-011	NF P94-050	Dmax(mm)	à 50mm	à 2mm	à 80µm	94-053			
SC1	1.45-2.5	GRAVES GROSSIERES	-	80	88	19	5	1.80			
SC1	3.1-4.4	GRAVES GROSSIERES	-	120	23	11	3	2.12			
SC1	7.9-9.4	GRAVES GROSSIERES	-	120	37	11	3	2.14			
SC1	10.0-11.2	GRAVES GROSSIERES	-	120	52	19	6	2.02			
SC2	2.15-3.1	GRAVES GROSSIERES	-	120	50	27	3	1.83			
SC3	4.2-5.3m	GRAVES GROSSIERES	-	120	50	10	2	1.57			

La teneur en fines (<80 µm) **de la matrice** est comprise entre 1 et 6%. En considérant que 50% en masse des éléments ont une dimension supérieure à 100 mm, la teneur en fines représente 0,5 à 3% de la masse totale.

Le graphique suivant présente les 4 granulométries réalisées sur les échantillons intacts du sondage SC2. Les proportions des différentes fractions granulométriques ont été recalculées en prenant l'hypothèse que 50% de la masse correspond à des blocs supérieurs à 100 mm. Elles sont comparées aux fuseaux granulométriques des matériaux du barrage déduits des granulométries avant compactage.

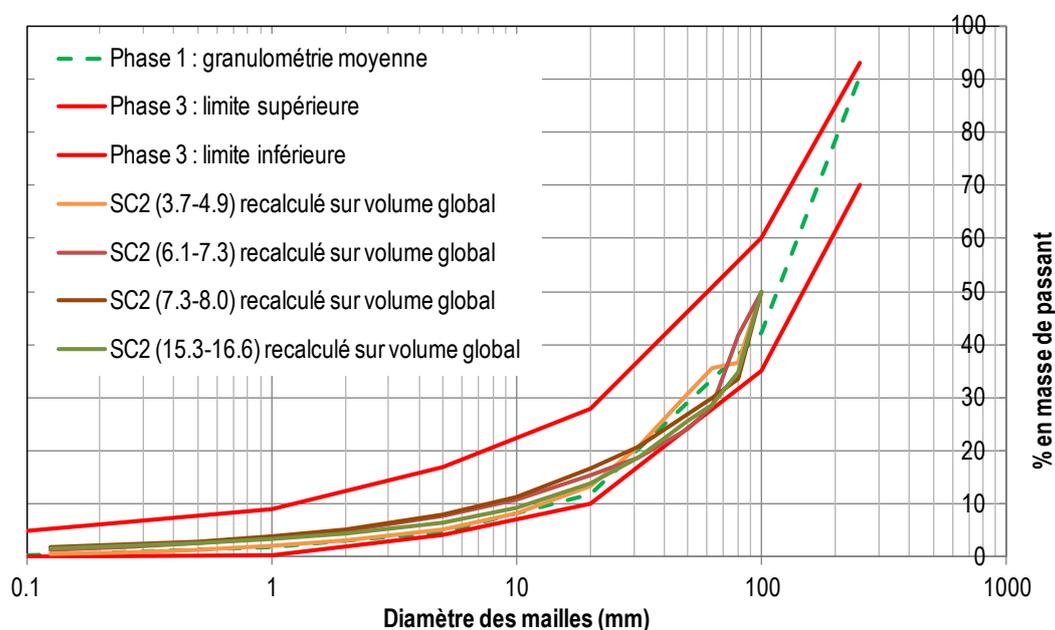


Figure 16 : Granulométrie carottage SC2

Les 4 courbes granulométriques correspondent à la partie basse du fuseau de la phase 3 des remblais. Elles sont également très proches de la valeur moyenne de la phase 1 des remblais.

3.3.2 BLOCOMETRIE

70 tonnes de matériaux extraits du barrage ont été transportés en carrière et 64 tonnes de matériaux ont été criblés avec des mailles de 150, 300, 500 et 700 et 1000 mm.

La différence de 6 tonnes entre la masse des matériaux transportés en carrière et la masse totale est justifiée par le bureau géotechnique en charge de l'opération par :

- une perte au sol (la partie inférieure du tas a volontairement été laissée en place afin de ne pas mélanger les matériaux extraits et ceux du site de stockage de la carrière),
- les pluies qui ont pu laver une partie des fines en surface.

Considérant qu'aucun élément supérieur à 300 mm n'a été laissé en fond de tas³, le bureau géotechnique propose les valeurs suivantes.

Tableau 10 : Blocométrie en carrière

Tamis	300 mm	500 mm	700 mm	1000 mm
% en masse	60%	90%	96%	100%

Ces valeurs sont à prendre avec précaution car elles ne correspondent qu'à une infime partie du barrage (de l'ordre de 1/10 000). Elles conduisent à une granulométrie un peu plus grossière que celles réalisées pendant la construction (cf. Figure 16) avec un D60 de 300 mm (contre 100 à 200 mm pour les granulométries historiques).

Cet écart peut s'expliquer par la granulométrie plus grossière du parement aval qui a été lavé au jet haute pression pendant les travaux de construction.

3.3.3 DENSITE

3.3.3.1 Mesures de la campagne de phase 1

Le tableau suivant donne les résultats des 4 premiers échantillons, tous issus du sondage SC2, par pesée directe. Selon le prestataire, cette méthode conduit à sous-estimer de 5 à 10% la densité en place des matériaux selon le taux de récupération de l'échantillon.

Echantillon	Masse volumique (t/m ³)	
	ρ_h	ρ_d
SC2 (3,7 – 4,5 m/TN)	1,81	1,73
SC2 (6,1 – 7,3 m/TN)	2,13	2,03
SC2 (7,3 – 8,0 m/TN)	2,03	1,96
SC2 (15,3 – 16,6 m/TN)	2,09	2,02

³ C'est-à-dire en considérant que les 6 tonnes manquantes sont dans la fraction 0-300 mm.

Tableau 11 : Résultats des mesures de densité

La valeur moyenne de la masse volumique humide est de 2,02 t/m³ et celle de la masse volumique sèche est de l'ordre de 1,94 t/m³. En prenant une correction de 7,5%, il vient des valeurs de 2,08 et 2,17 t/m³.

3.3.3.2 Mesures de la campagne de phase 2

Dans le cadre de la campagne de phase 2, des pesées directes des carottes ont été réalisées en laboratoire. Le volume est celui de la gaine. Encore, une fois, il s'agit de densités humides dont les valeurs sont plus ou moins sous-estimées selon le taux de récupération. Le graphique suivant présente les densités mesurées en fonction de la profondeur moyenne des échantillons (avec les moyennes mobiles sur 5 essais).

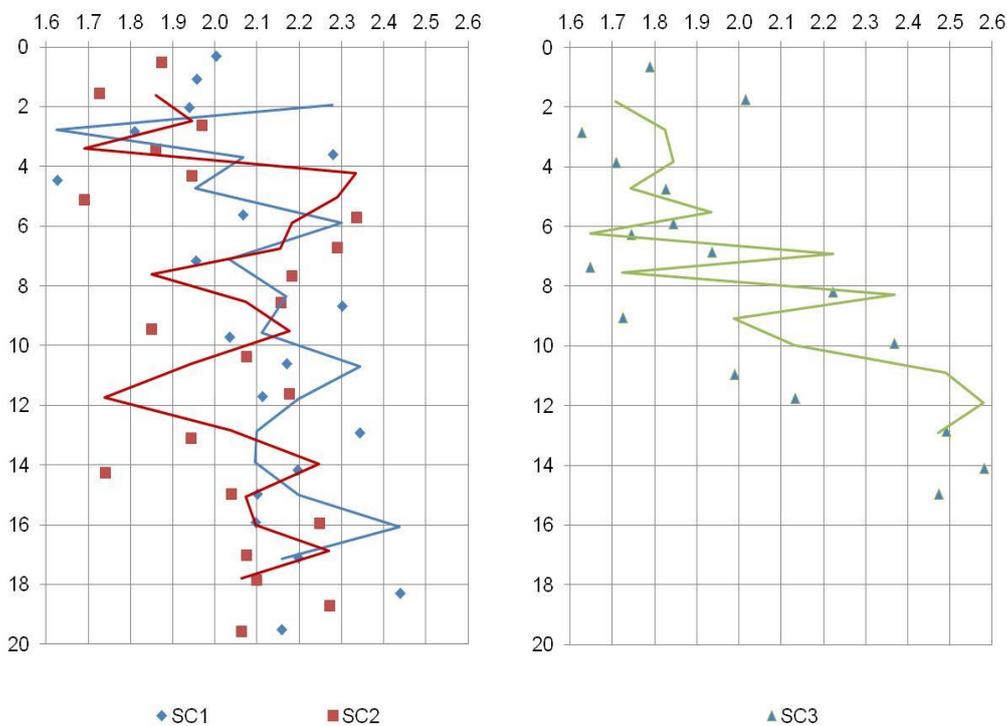


Figure 17 : mesures de densité humides en laboratoire (et moyennes mobiles sur 5 valeurs)

Ce graphique appelle les commentaires suivants :

- les valeurs varient entre 1,5 (probablement liée à un taux de récupération moindre) et 2,4 (découpe d'un bloc) ;
- les valeurs moyennes pondérées par la longueur des échantillons sont de :
 - . 1,98 pour SC1 (crête du barrage),
 - . 1,90 pour SC2 (deuxième risberme en partant du bas),
 - . 1,83 pour SC3 (risberme en enrochements déversés formant une protection en pied du barrage).
- on note une amélioration avec la profondeur au-delà de 8 à 10 m.

En appliquant une correction de +7,5%, il vient pour **SC1 et SC2** une valeur moyenne de densité humide de **2,09**.

Les valeurs en SC3 sont cohérentes avec la méthode de mise en œuvre (en partie par déversement). Avec une correction de 7,5%, il vient une valeur de 1,96 t.

3.3.3.3 Sondes FDS

Les mesures de densité par FDS ont été calées sur la densité du substratum mesurée en laboratoire. Un exemple est présenté ci-dessous (FSD31 et FDS12 en crête). Si on se réfère aux sondages représentatifs du remblai du barrage (SC1), il vient une **densité humide de l'ordre de 2,2**.

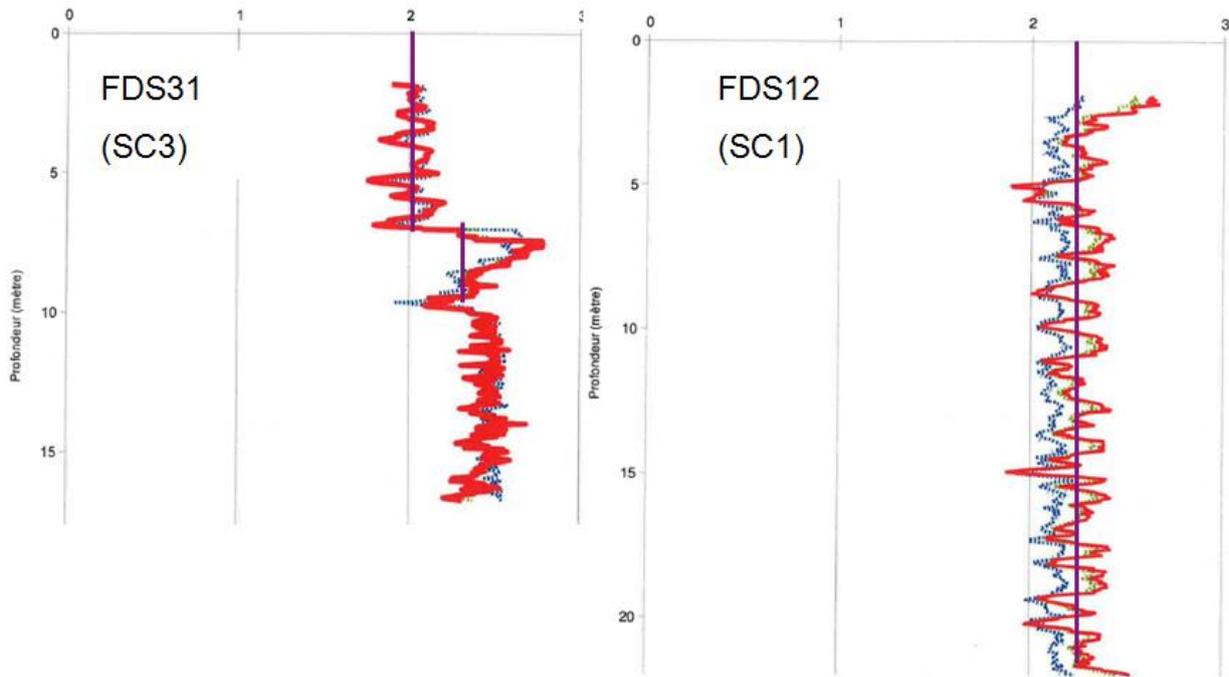


Figure 18 : logs FDS

3.3.4 ESSAIS SUR LES ENROCHEMENTS

Le tableau suivant présente les résultats d'une série d'essais réalisés sur les enrochements du barrage avec :

- 4 essais de type Micro-deval qui visent à qualifier la résistance à l'usure du matériau par frottement,
- 4 essais de type Los Angeles qui visent à qualifier la résistance à l'usure par choc et poinçonnement,
- 5 essais de détermination de la résistance au gel (NF EN 1367-1) qui vise à apprécier la résistance aux cycles gel-dégel,
- 5 essais de compression simple,
- 3 mesures d'indice de continuité par mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores (NF P94-411).

Tableau 12 : Essais de laboratoire sur les matériaux du barrage

ESSAIS D'IDENTIFICATION			Granulométrie par tamisage				Essai à l'usure Micro Deval 10/14	Essai Los Angeles 10/14	Essai de Gel 4/8	Essais de compression simple	Vitesse longitudinale
Sondages	Profondeurs	Description	% de passant				NF EN 1097-1	NF EN 1097-2	NF EN 1367-1	NF P-94-420	NF P-94-411
-	m	XP P94-011	Dmax(mm)	à 50mm	à 2mm	à 80µm	%	%	%	Mpa	m/s
			NF P94-056								
SC1	4.8-6.40	GRAVES concassées					24.4	23.6	0.3%		
SC1	6.40-7.90	GRAVES concassées									
SC1	12.20-13.60	GRAVES concassées					25.4	27.0	0.6%		
SC3	1.30-2.20	GRAVES concassées					18.2	21.1	0.3%		
SC3	10.50-11.40	GRAVES concassées					19.4	23.9	0.4%		
G1		GRAVES anguleuses	120	52.3	15.5	5.3					
G2		GRAVES anguleuses	100	71.0	24.4	8.1					
G3		GRAVES anguleuses	150	39.6	24.9	9.1					
G4		GRAVES anguleuses	100	65.4	24.8	8.6					
SC1	9.1-9.3m	Gneiss								23.3	3063
SC1	12.4-12.6	Micaschiste								53.2	
SC1	18.6-18.8	Gneiss								36.6	2356
SC2	8.35-8.6	Gneiss								43.7	2701
Sc3	11.8-12.0m	Micaschiste								63.6	

Les résultats des essais micro-Deval sont homogènes avec des valeurs comprises entre 19% et 25%. Il en est de même pour les valeurs obtenues par essais Los Angeles avec des valeurs comprises entre 21% et 27%. La somme des deux valeurs est comprise entre 39% et 52% selon les échantillons.

La norme relative aux enrochements classe les enrochements avec un micro-Deval inférieur à 30 comme enrochements pouvant être utilisés dans un « environnement modérément abrasif comme mers avec de grosses vagues occasionnelles ou une action du courant chargé de sédiment ».

Les résultats des micro-Deval et Los Angeles peuvent également être examinés en utilisant la norme P18-450 relative à la qualité des granulats dont est issu le tableau suivant.

Tableau 13 : Grille de référence de la norme P18-450

Catégorie	LA + MDE	ET	LA	ET	MDE
	Vss				
B	35	ET	25	ET	20
C	45		30		25
D	55		35		30
E	80		45		45
F	Pas de spécifications mais FTP renseignée				

Cette grille permet de classer la résistance au frottement des granulats pour les usages courants (béton notamment). Les meilleurs granulats sont en classe B et les moins bons en D. Trois échantillons sur quatre se classent dans la catégorie C (bon). Le quatrième se situe en classe D (moyen à bon).

Les valeurs au gel sont homogènes et inférieures à 0,6%.

Les résistances à la compression sont comprises entre 23 et 64 MPa, valeurs attestant d'une qualité moyenne pour un enrochement selon la grille suivante proposée par l'AFTES. Leurs caractéristiques sont probablement altérées par la microfissuration.

Tableau 14 : grille AFTS

CLASSES	VALEURS DE RESISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE σ_c	TERMES DESCRIPTIFS DE RESISTANCE
RC 1	$\sigma_c > 200$ MPa	Résistance extrêmement élevée
RC 2	$100 \text{ MPa} < \sigma_c < 200$ MPa	Résistance très élevée
RC 3	$50 \text{ MPa} < \sigma_c < 100$ MPa	Résistance élevée
RC 4	$25 \text{ MPa} < \sigma_c < 50$ MPa	Résistance moyenne
RC 5	$5 \text{ MPa} < \sigma_c < 25$ MPa	Résistance faible
RC 6	$1 \text{ MPa} < \sigma_c < 5$ MPa	Résistance très faible
RC 7	$\sigma_c < 1$ MPa	Résistance extrêmement faible

Tableau 5 - Classes de résistance en compression uniaxiale

Les indices de continuité sont compris entre 39 et 51% traduisant une continuité faible à moyenne qui n'est pas surprenante pour ce type de roche.

Les tableaux suivants présentent les résultats des lames minces.

Tableau 15 : Lame mince SC1-1

Référence : SC1 0,62-1,45

Cote :

Date de prélèvement :

Minéral	Compte /600	Teneur %	Remarques
Microquartz recristallisé	126	21,0	Silice réactive
Quartz (SiO ₂)	254	42,3	
Feldspaths potassiques	22	3,7	
Micas	194	32,3	
Minéraux opaques	4	0,7	

Tableau 16 : Lame mince SC3-1

Référence : SC3 0,13

Cote :

Date de prélèvement :

Minéral	Compte /600	Teneur %	Remarques
Quartz (SiO ₂)	224	37,3	
Feldspaths potassiques	2	0,3	
Microquartz recristallisé, silice microcristalline et fibreuse	92	15,3	Silice réactive
Micas	278	46,3	
Minéraux opaques	4	0,7	

Tableau 17 : Lame mince SC3-2

Référence : SC1 3,1-4,4

Cote :

Date de prélèvement :

Minéral	Compte /600	Teneur %	Remarques
Quartz (SiO ₂)	190	31,7	
Microquartz de recristallisation	120	20,0	Silice Réactive
Feldspaths potassiques	50	8,3	
Micas	226	37,7	
Minéraux opaques	14	2,3	

Tableau 18 : Lame mince SC2-1

Référence : SC2 3,1-3,7

Cote :

Date de prélèvement :

Minéral	Compte /600	Teneur %	Remarques
Quartz (SiO ₂)	150	25,0	
Microquartz de recristallisation	204	34,0	Silice réactive
Feldspaths potassiques	72	12,0	
Micas	170	28,3	
Minéraux opaques	4	0,7	

Les lames minces ont mis en évidence une proportion de 15 à 35% de microquartz à silice réactive.

3.3.5 TRIAXIAUX DE GRANDS DIAMETRES

3.3.5.1 Préambule

Les essais triaxiaux de gros diamètres ont été réalisés sur la fraction 0/150 mm de la granulométrie du barrage par l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique de l'Ecole Centrale de Nantes. La coupure granulométrique est imposée par la nécessité de respecter un rapport d'au moins 6 entre le diamètre des échantillons (1 mètre) et la dimension des plus gros grains.

Les matériaux sont issus du criblage des matériaux terrassés dans la tranchée réalisée dans le barrage. La fraction 0/150 mm représente environ 60% en masse des matériaux du barrage. Environ 15 tonnes de matériau ont été transférés en big-bags du site de criblage au laboratoire. Ils ont été entreposés de manière à assurer leur séchage.

3.3.5.2 Préparation de l'essai

Les échantillons sont reconstitués dans un moule cylindrique de 1 mètre de diamètre et de 1,5 m de hauteur. Une membrane en PVC thermo-collable de 1,5 mm d'épaisseur est plaquée contre ce moule. Une seconde membrane, du même type et de même épaisseur, ainsi qu'un film géotextile faisant office de drain latéral, sont positionnés à l'intérieur de la première membrane et sont libres afin d'éviter toute sur-contrainte latérale additionnelle.

Le moule et les membranes sont ensuite positionnés sur une embase en acier de 10 cm d'épaisseur, munie d'une grille métallique poreuse pour assurer le drainage de l'échantillon. Cette grille est protégée de l'intrusion de fines par un film géotextile perméable. Le volume est approximativement de 1,2 m³.



Figure 19 : Echantillon dans le moule

Le matériau est ensuite déposé à l'intérieur du moule, par couches de 100 kg, auxquelles on rajoute la masse d'eau nécessaire pour atteindre l'objectif de teneur en eau fixé, i.e. 5 %. Le matériau est densifié par vibrations à l'aide d'une aiguille vibrante (cas de la première série de 3 essais à une masse volumique humide comprise entre 2050 et 2100 kg/m³) ou par vibrations et damage manuel (cas de la seconde série de 3 essais à une masse volumique comprise entre 2150 et 2200 kg/m³). La hauteur des différentes couches est contrôlée de manière à s'assurer de la répétabilité d'un essai à l'autre et de l'homogénéité de la densité dans un échantillon.

Une fois le moule rempli, on dépose un film géotextile perméable sur la face supérieure de l'échantillon puis l'embase supérieure munie d'un orifice drainant. L'échantillon est alors placé sous vide (application d'une dépression comprise entre 50 et 90 kPa). Le moule peut être retiré. On mesure les dimensions de l'échantillon (4 hauteurs et 5 circonférences), ce qui déterminera son volume initial.

3.3.5.3 Réalisation de l'essai

La cellule est finalement remplie d'eau, utilisée comme fluide de confinement. La pression de ce fluide de confinement est portée à la valeur de la consolidation souhaitée, tout en relâchant progressivement la dépression à l'intérieur de l'échantillon. Après consolidation, l'échantillon est cisailé, à vitesse de déplacement imposée, à l'aide d'un vérin de 2000 kN de capacité à une vitesse de 0,6 mm/min, sous confinement constant, en condition drainée. La déformation axiale maximale est comprise entre 15 et 18 %.



Figure 20 : Eprouvette avant et après écrasement

Pendant la phase de cisaillement, on enregistre les paramètres suivants :

- Force axiale
- Déplacement axial
- Pression de confinement (mesurée à la base de l'échantillon)
- Variations de volume (par échange du fluide de confinement avec l'extérieur, corrigé de la pénétration du piston de chargement dans l'enceinte)

3.3.5.4 3 – Paramètres des essais

Les essais suivants ont été réalisés

- 3 essais à des confinements de 100, 200 et 400 kPa pour une densité volumique humide (ρ_h) comprise entre 2,05 et 2,09 (valeur moyenne de 2,08)

- 3 essais à des confinements de 100, 200 et 300 kPa pour une densité volumique humide (ρ_h) comprise entre 2,16 et 2,17 (valeur moyenne de 2.16)

L'ordre de grandeur de l'incertitude sur les densités volumiques humides ρ_h est de $\pm 0,050$.

3.3.6 RESULTATS DES ESSAIS

Le graphique suivant présente le déviateur des contraintes en fonction de la déformation axiale pour les 6 essais (en rouge les essais avec des densités comprises entre 2,05 et 2,09 et en bleu les essais réalisés avec des densités comprises entre 2,16 et 2,17).

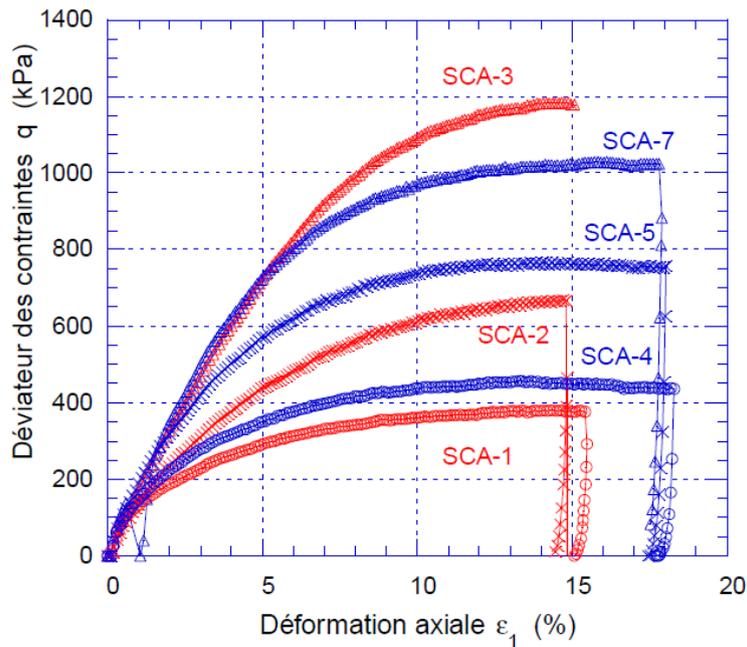


Figure 21 : Déviateur des contraintes en fonction de la déformation axiale

Les graphiques suivants présentent l'évolution des contraintes dans le plan de Mohr pour les 2 séries d'essais.

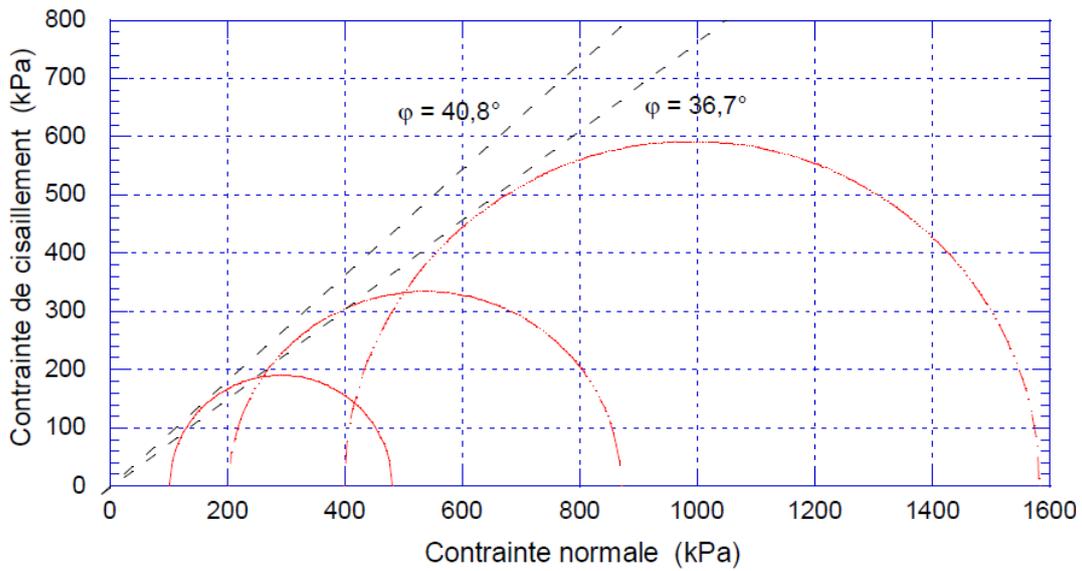


Figure 22 : Evolution des contraintes dans le plan de Mohr (dh = 2,08)

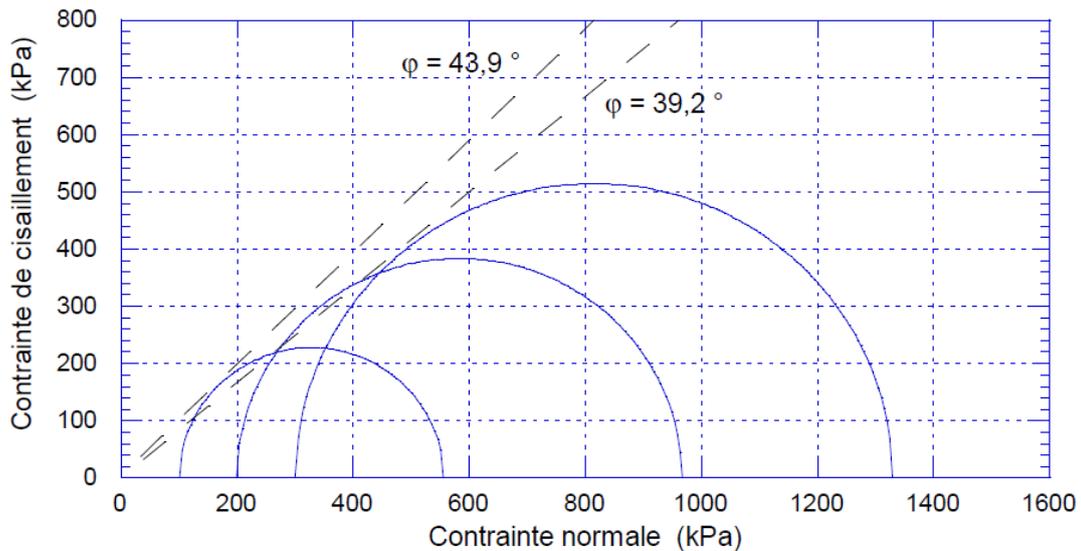


Figure 23 : Evolution des contraintes dans le plan de Mohr (dh = 2,16)

Pour une densité moyenne humide de 2,08, l'angle de frottement varie de 41° à 37° lorsque la contrainte de confinement augmente.

Pour une densité moyenne humide de 2,16, l'angle de frottement varie de 44° à 40° lorsque la contrainte de confinement augmente.

Le graphique suivant présente, pour chaque série :

- les estimations des angles de frottement en fonction de la contrainte de confinement,
- le calage de lois de type Barton (expression de l'angle de frottement à partir du logarithme de la contrainte de confinement) à partir de ces valeurs.

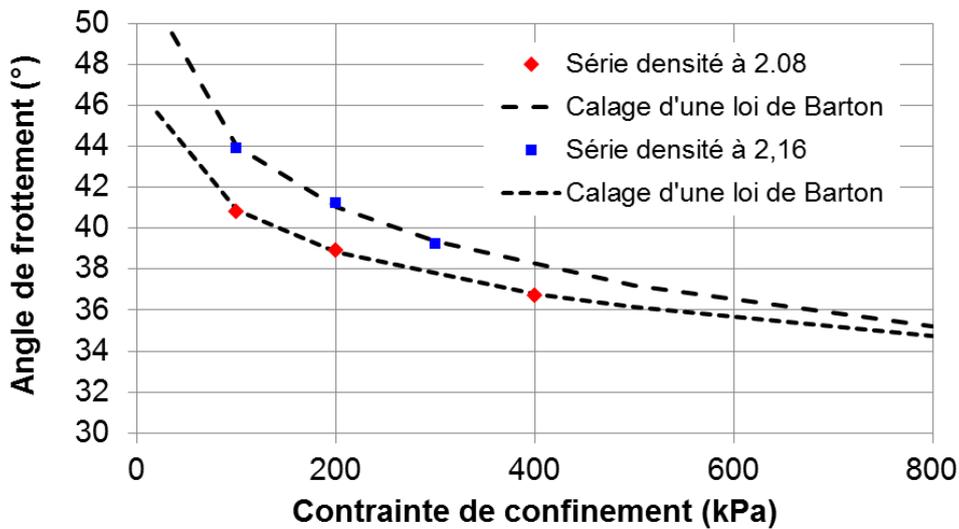


Figure 24 : synthèse des essais triaxiaux de grands diamètres

Le calage des lois de type Barton est satisfaisant et permet d’apprécier les évolutions des angles de frottement en fonction de la profondeur des enrochements.

En surface, les angles de frottement peuvent atteindre 45 à 50° selon la densité. Ces angles vont s’amenuiser avec la profondeur et on peut estimer qu’ils sont à minima d’environ 35° à la base du barrage dans l’axe du barrage.

Ces valeurs peuvent être comparées à celles obtenues en assimilant le matériau du barrage à une grave frottante à partir du tableau suivant.

Tableau 19 : Influence des caractéristiques physique d’un matériau sur l’angle de frottement

$\varphi' = 36^\circ + \varphi'_1 + \varphi'_2 + \varphi'_3 + \varphi'_4$			
Compacité	φ'_1	-6° 0° +6°	lâche : $I_D = 0,4$ moyen : $I_D = 0,6$ serré : $I_D = 0,9$
Forme et rugosité des grains	φ'_2	+1° 0° -3° -5°	aigu moyen arrondi sphérique
Grosseur des grains	φ'_3	0° +1° +2°	sable fin $0,06 \text{ mm} < D_{10} < 0,2 \text{ mm}$ gravier $0,6 \text{ mm} < D_{10} < 2 \text{ mm}$ gros gravier $D_{10} > 2 \text{ mm}$
Répartition granulaire	φ'_4	-3° 0° +3°	uniforme $c_u \leq 2$ moyenne $2 < c_u < 5$ étalée $c_u \leq 5$

Le matériau peut être considéré comme compact (+6°), aigu (+1°), grossier (+2°) et granulométrie étalée (+3°) ce qui conduit à une première valeur de 47°.

Cette valeur est dans la fourchette de valeurs déduites des essais triaxiaux pour un confinement faible (45 à 50°).

Concernant les modules de déformabilité, pour des niveaux de déformation de l'ordre de 0,3 à 0,5 %, les fluctuations des modules déterminés à partir des essais sont faibles (15 à 24 Mpa) et conduisent à une valeur moyenne de 20 MPa.

3.4 RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES

3.4.1 IMPLANTATION

L'extrait de plan suivant présente l'implantation des géophones des reconnaissances géophysiques réalisées avec :

- en pied de barrage, en fond de vallée, 1 profil amont/aval (D1) et 2 profils rive-rive (D2 et D3) : il s'agit de profils en sismique réfraction pour partie terrestre et pour partie aquatique ;
- sur le barrage, 3 profils d'onde sismique de surface (MASW) situés en crête (A) et sur les 2 risbermes inférieures (B et C).

Les profils en sismique réfraction ont été limités en fond de vallée car les affleurements sont clairement visibles sur les berges.

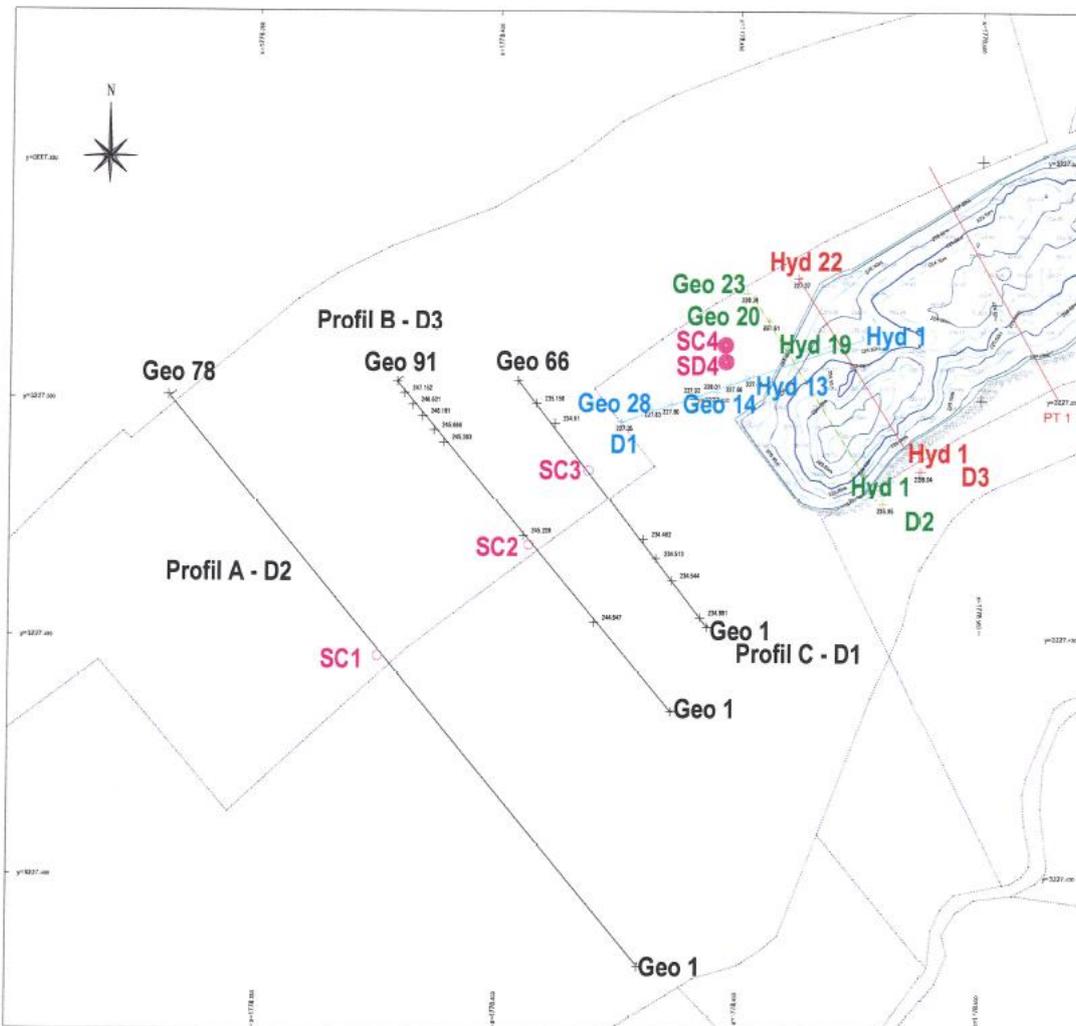


Figure 25 : implantation des géophones et hydrophones

3.4.2 PROFILS SISMIQUES REFRACTION

L'acquisition a distingué des profils terrestres et des profils aquatiques.

Les profils amont/aval D1 aquatique et terrestre sont présentés ci-dessous.

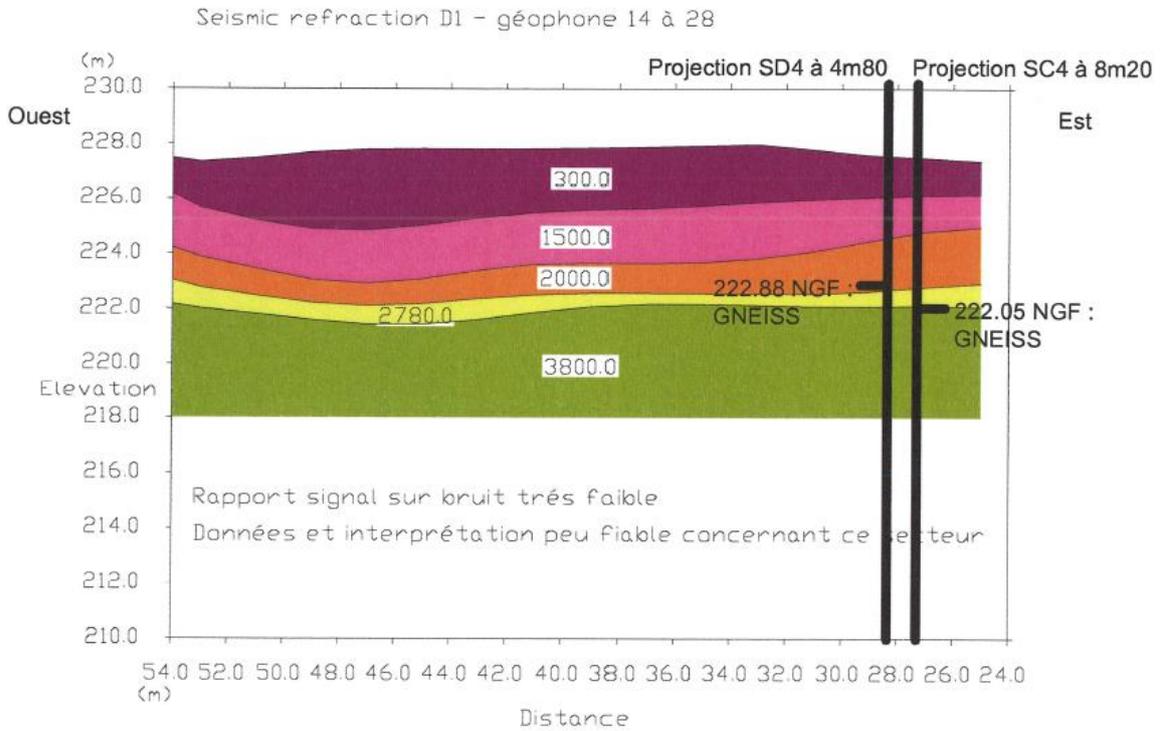


Figure 26 : profil D1 (amont-aval) partie terrestre

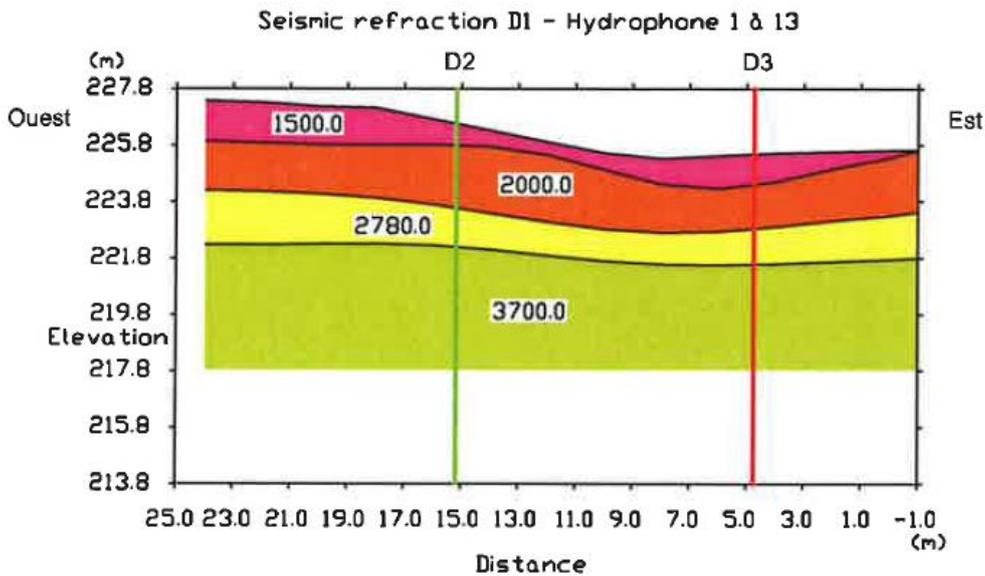
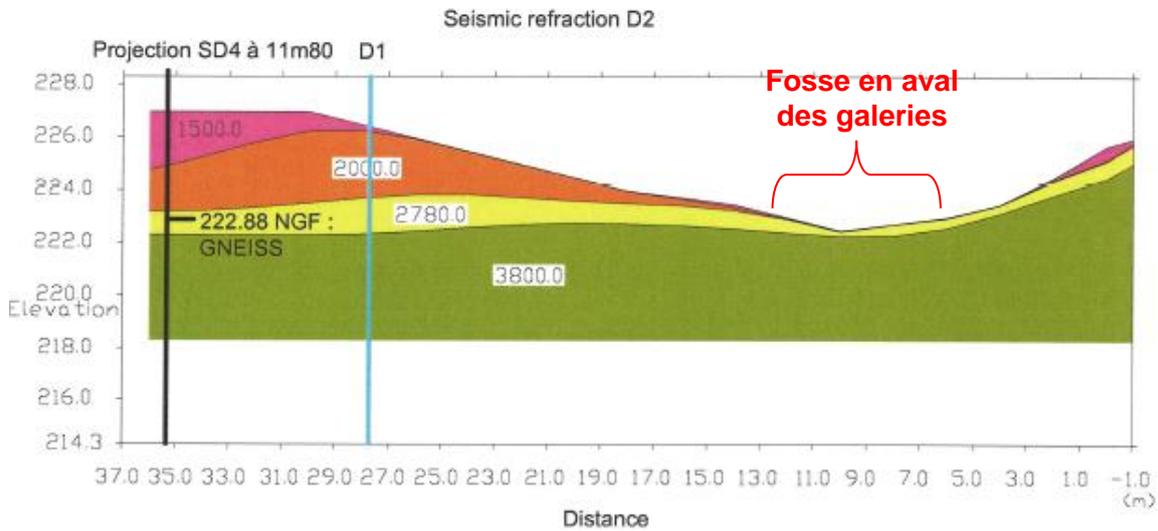


Figure 27 : profil D1 (amont-aval) partie aquatique

Le profil rive-rive aquatique D2 (le plus près du barrage) est présenté ci-dessous. La rive gauche est à gauche.



Profil D2 sismique réfraction : partie aquatique

Figure 28 : Profil D2 (rive-rive amont)

Le profil rive-rive aquatique D3 (le plus loin du barrage) est présenté ci-dessous. La rive gauche est à gauche.

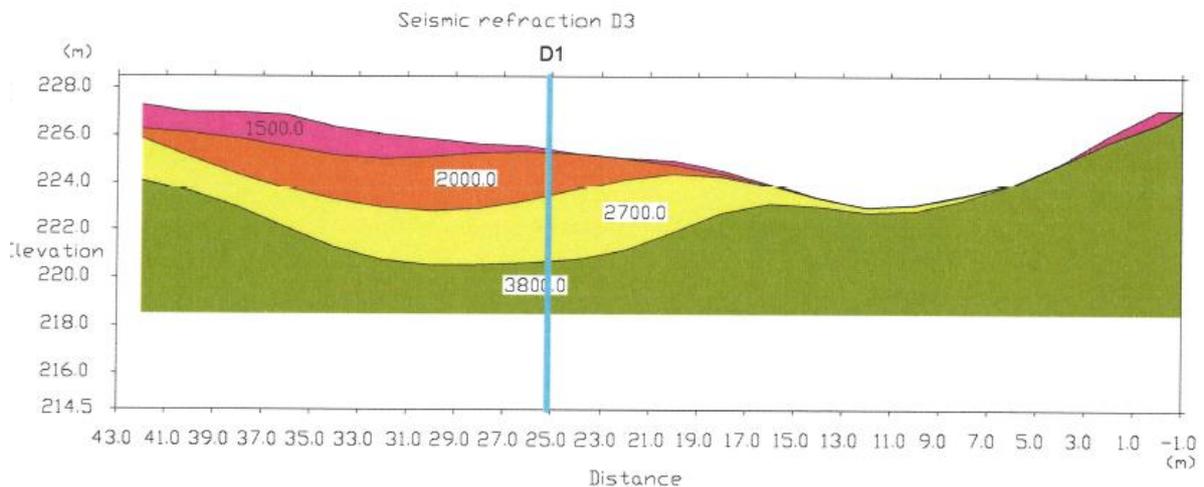


Figure 29 : Profil D3 (rive-rive aval)

Par corrélation avec les sondages carottés, les classes suivantes ont été proposées :

- Alluvions et remblais : 300 à 2000 m/s (variable selon la saturation)
- Rocher altéré : ~2800 m/s
- Rocher sain : ~ 3700 m/s

Les cotes du rocher sain ($v=3700$ m/s) sont cohérentes avec celles déduites de la bathymétrie. En particulier, le nettoyage du rocher altéré constaté en aval des galeries, au droit de la fosse, est bien visible sur D2 (cf. Figure 28).

L'altitude du toit du rocher sain apparait régulière en D2 ce qui est favorable pour limiter les affouillements en pied de barrage dans la zone de dissipation des éventuels évacuateurs posés sur le barrage.

Le profil D3, plus éloigné du barrage, montre un approfondissement du rocher sain qui n'est pas visible sur D1. Les cotes au croisement de ces deux profils laissent apparaître une incertitude d'environ 1,5 m sur la transition entre rocher sain et rocher altéré.

3.5 BILANS DES RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES

Les reconnaissances ont confirmé un certain nombre de points déduits de la bibliographie et en particulier le caractère hétérogène dans le détail du matériau. L'examen des carottes ne permet pas de mettre en évidence un quelconque zonage du barrage comme pourrait le laisser supposer la bibliographie (zone théorique 1 et 1bis) et il peut être considéré comme homogène en grand.

Au droit de la tranchée, le remblai apparait comme un matériau 0/500 mm hétérogène à l'échelle des plus gros blocs (0,5 à 1,0 m). Il est alternativement ouvert (peu de matrice) ou fermé (riche en matrice). Les blocs sont anguleux à émoussés. La fraction la plus fine (matrice et petits blocs) est dominante en surface. Elle est composée de silts et de sables fins à grossiers.

Les granulométries présentent en moyenne une proportion de blocs supérieurs 100 mm de l'ordre de 50% en masse ce qui est cohérent les résultats des carottes (en supposant une densité de l'ordre de 2,6 pour les blocs et 2,0 pour le reste des matériaux) en considérant une légère fragmentation au compactage.

La norme relative aux enrochements classe les enrochements avec un micro-Deval inférieur à 30 comme enrochements pouvant être utilisés dans un « environnement modérément abrasif comme mers avec de grosses vagues occasionnelles ou une action du courant chargé de sédiment ». Les valeurs aux gels sont homogènes et inférieures à 0,6%.

Les résistances à la compression sont comprises entre 23 et 64 MPa, valeurs attestant d'une qualité moyenne pour un enrochement (selon la grille proposée par l'AFTES).

Les indices de continuité sont compris entre 39 et 51% traduisant une continuité faible à moyenne qui n'est pas surprenante pour ce type de roche.

La teneur en fines (<80 μ m) **de la matrice** (est comprise entre 1 et 6% ce qui représente 0,5 à 3% en considérant que 50% en masse des éléments ont une dimension supérieure à 100 mm).

Des pertes totales d'eau ont été constatées de manière fréquente traduisant la forte perméabilité en grand du remblai

Les pressions limites mesurées (P_l^* moyen = 2,8 MPa) dans le remblai correspondent à des graves moyennement compactes à compactes. Jusqu'à 13 m, la variation selon la profondeur des valeurs mesurées traduit un compactage efficace avec une contrainte de compactage supérieure à la contrainte de confinement actuelle. Au-delà de 13 m, les résultats traduisent une légère amélioration liée à des contraintes de confinement (~ 350 kPa) supérieures à celles exercées lors du compactage.

Les différentes méthodes de mesure de densité ont conduit à une valeur moyenne de 2,1 à 2,2.

Les triaxiaux grands diamètres du fuseau de 0/150 mm (représentant environ 60% des matériaux du barrage) conduisent à un angle de frottement de 38 à 44° selon le confinement (300 kPa à 100 kPa).

En aval du barrage, il est confirmé que la cote du rocher sain coïncide avec la cote du fond de la fosse qui s'est formée en aval de la galerie. Cette cote est régulière d'une rive à l'autre ce qui va naturellement limiter la profondeur de la fosse susceptible de se créer à la réception des évacuateurs sur remblai.

ANNEXE 6b CAMPAGNE GEOTECHNIQUE PHASE PROJET



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

RESTRICTED

SAINTE CECILE D'ANDORGE DAM ROCKFILL

**Traditional oedometer tests and oedometer tests followed
by vibration tests**



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

RESTRICTED

SAINTE CECILE D'ANDORGE DAM ROCKFILL

**Traditional oedometer tests and oedometer tests followed
by vibration tests**

GINGER CEBTP

Lisbon • April 2021

OS&TA GEOTECHNICS

REPORT 123/2021 – **DG/Chefia**

Title

SAINTE CECILE D'ANDORGE DAM ROCKFILL

Traditional oedometer tests and oedometer tests followed by vibration tests

Authors

GEOTECHNICS DEPARTMENT

Laura Caldeira

Principal Researcher, Department Director

João Bilé Serra

Senior Researcher with Habilitation

Collaboration

GEOTECHNICS DEPARTMENT

Joaquim Timóteo

Senior Technician

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Report 123/2021

File no. 0501/1301/17094

SAINTE CECILE D'ANDORGE DAM ROCKFILL

Traditional oedometer tests and oedometer tests followed by vibration tests

Abstract

In this report, the results of the laboratory tests of rockfill material of the Sainte Cecile D'Andorge dam are presented. The testing program consists of grain size analyses and four oedometer tests with flooding, the first two up to maximum vertical stress of 500 kPa and the other two up to maximum vertical stress of 200 kPa, followed by vibration tests.

Keywords: Sainte Cecile D'Andorge / Dam / Rockfill material / Laboratory tests

ENROCAMENTO DA BARRAGEM DE SAINTE CECILE D'ANDORGE

Ensaio edométrico convencional e ensaio edométrico seguidos de ensaio de vibração

Resumo

Apresentam-se, neste relatório, os resultados dos ensaios de laboratório do enrocamento da barragem de Sainte Cecile D'Andorge. O programa de ensaios consistiu na realização de análises granulométricas e de quatro ensaios edométricos com inundação, os dois primeiros até uma tensão máxima vertical de 500 kPa e os restantes até uma tensão máxima vertical de 200 kPa, seguidos de ensaios de vibração.

Palavras-chave: Sainte Cecile D'Andorge / Barragem / Material de enrocamento / Ensaio de laboratório

Table of contents

1	Introduction.....	1
2	Particle size distribution analysis	2
	2.1 Procedures.....	2
	2.2 Test results.....	3
3	Oedometer compression tests	4
	3.1 Test procedures	4
	3.2 Test results.....	7
	3.2.1 First test	7
	3.2.2 Second test	11
	3.2.3 Third test	13
	3.2.4 Fourth test.....	14

List of figures

Figure 2.1 – View of different size fractions of the material	2
Figure 2.2 – Grain size analysis curves of the material as received and after preparation of the specimens	3
Figure 3.1 – DU50 cell assembled and in testing position at the loading frame	4
Figure 3.2 – Vibratory hammer in use during specimen compaction	5
Figure 3.3 – View of the cell with the rigid plate and vibratory hammer at the top, and measuring devices	7
Figure 3.4 – 1 st test: axial displacement <i>versus</i> time, including two loading steps, flooding phase, two additional loading steps and four unloading steps	8
Figure 3.5 – 1 st test: axial displacement <i>versus</i> time during the five loading steps	9
Figure 3.6 – 1 st test: axial displacement <i>versus</i> time during the four unloading steps	9
Figure 3.7 – 1 st test: axial strain <i>versus</i> axial stress	10
Figure 3.8 – 1 st test: after test particle-size distribution curve	10
Figure 3.9 – 2 nd test: axial displacement <i>versus</i> time, including two loading steps and flooding phase	11
Figure 3.10 – 2 nd test: axial displacement <i>versus</i> time during the two loading steps	12
Figure 3.11 – 2 nd test: axial strain <i>versus</i> axial stress	12
Figure 3.12 – Vibration after the second test: settlement <i>versus</i> vibration time	13
Figure 3.13 – Particle-size distribution curves of specimen as prepared, after the first test completion and after the second test completion	14
Figure 3.14 – 3 rd test: axial displacement <i>versus</i> time, including five loading steps, flooding phase, and four unloading steps	15
Figure 3.15 – 3 rd test: axial displacement <i>versus</i> time during the five loading steps	15
Figure 3.16 – 3 rd test: axial displacement <i>versus</i> time during the four unloading steps	16
Figure 3.17 – 3 rd test: axial strain <i>versus</i> axial stress	16
Figure 3.18 – 3 rd test: after test particle-size distribution curve	17
Figure 3.19 – 4 th test: axial displacement <i>versus</i> time, including two loading steps and flooding phase	18
Figure 3.20 – 4 th test: axial displacement <i>versus</i> time during the two loading steps	18
Figure 3.21 – 4 th test: axial strain <i>versus</i> axial stress	19
Figure 3.22 – Vibration after the fourth test: settlement <i>versus</i> vibration time	20
Figure 3.23 – Particle-size distribution curves of specimen as prepared, after the completion of all tests	20

List of tables

Table 3.1 – 1 st test: physical and geometrical data of specimens.....	8
Table 3.2 – 2 nd test: physical and geometrical data of specimens.....	11
Table 3.3 – Vibration after the second test: frequency, peak acceleration, peak velocity and peak displacement after 0, 7, 15, 30, 60 and 90 minutes.....	13
Table 3.4 – 3 rd test: physical and geometrical data of specimens	14
Table 3.5 – 4 th test: physical and geometrical data of specimens.....	17
Table 3.6 – Vibration after the fourth test: frequency and peak vertical acceleration up to 179 minutes.....	19

1 | Introduction

Following the request of Dr. Jean-Jacques Fry by e-mail dated October 23th 2020, LNEC submitted a Work Plan for the laboratory testing of the rockfill material of Sainte Cecile D'Andorge dam, which included:

- A traditional oedometer tests, with the material compacted with standard Proctor effort, loaded up to a vertical stress of 200 kPa, flooded, loaded from 200 kPa to 500 kPa, and unloaded.
- An oedometer test followed by a vibration test, with the material compacted with standard Proctor effort, loaded up to a vertical stress of 200 kPa, flooded and unloaded. It was followed by the application of vibration, with maximum frequency of 50 Hz and amplitude of vertical acceleration around 0,3 g, on the top of the sample (by a vibratory plate) during 3 hours.
- A traditional oedometer tests, with the material compacted with standard Proctor effort, loaded up to a vertical stress of 500 kPa, flooded, and unloaded.
- An oedometer test followed by a vibration test, with the material compacted with standard Proctor effort, loaded up to a vertical stress of 200 kPa, flooded and unloaded. It was followed by the application of a vibration, with maximum frequency of 50 Hz and amplitude of vertical acceleration around 0,2 g, on the top of the sample (by a vibratory plate) during 3 hours.
- Grain size analyses of the material as received, after preparation of the specimens and after the vibratory tests.

This report presents the laboratory program pursued and the corresponding procedures as well as the results obtained.

2 | Particle size distribution analysis

2.1 Procedures

The visual aspect of the material is shown in Figure 2.1.



Figure 2.1 – View of different size fractions of the material

Prior to the test the required mass of material was homogenised. The test was performed with material previously washed in advance according with ASTM D1140 – 14 standard (ASTM^b).

2.2 Test results

The grain size distribution of the material as received is shown in Figure 2.2. Based on these results, Dr. Jean-Jacques Fry proposed to use in the preparation of the specimens the following relation: a selected dry weight, W , of the fraction of the material smaller than 63 mm mixed with material of the fraction with dimensions between 20 and 63 mm, weighing $1,5 W$. The grain size curve thus obtained is also displayed in Figure 2.2.

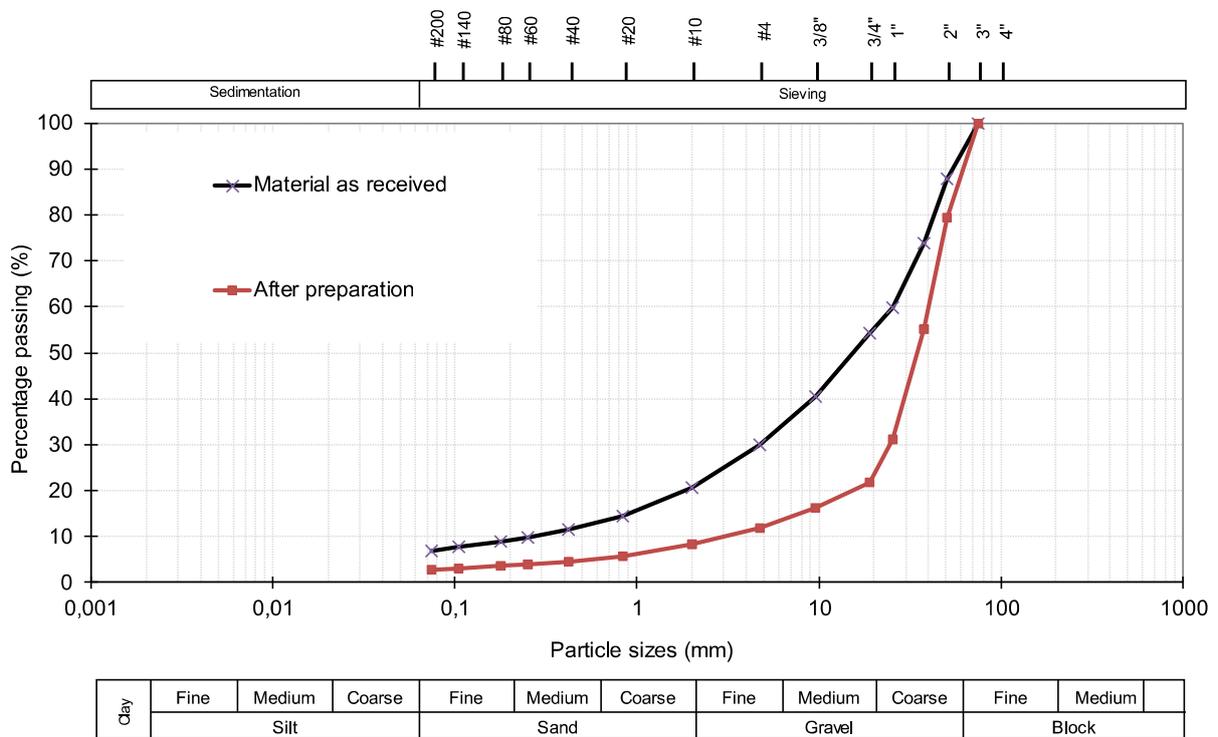


Figure 2.2 – Grain size analysis curves of the material as received and after preparation of the specimens

3 | Oedometer compression tests

3.1 Test procedures

The oedometer tests were performed in an oedometer cell DU50, an in-house design and production of LNEC. It allows testing of specimens of large sized particles, such as rockfill and of soil-rockfill mixtures, in a uniaxial mode of deformation with k_0 conditions.

The cell wall is made by an alternate sequence of 12 aluminium rings and 11 rubber rings. A base plate and a very stiff top cap, both in hardened steel, mutually connected by four long screws, to close the cell ends. The screws are kept active only during the specimen setup and transportation to the loading frame. The cell is shown in Figure 3.1.



Figure 3.1 – DU50 cell assembled and in testing position at the loading frame

The presence of the rubber rings aims at accommodating any large axial compression of the specimen. As the axial deformation of the container equals the specimen axial deformation, no provision for controlling friction development is necessary. Notwithstanding the inclusion of the rubber rings, no compromise results to the required radial stiffness of the cell since the aluminium rings provide this stiffness.

The maximum height of the specimen and its diameter are 500 mm. The operational capacity of the cell allows testing compacted specimens of particles sized up to 100 mm (i.e., a fifth of the diameter) with an axial compressive stress up to 2 MPa. The actual maximum axial stress is limited by the load frame capacity.

The specimens were compacted inside the cell mounted on the base pedestal. A total number of seven layers with average thickness close to 68.7 mm were considered. The compaction of each layer was obtained with a vibratory hammer with a weight of 354 N (Figure 3.2). The vibration frequency of 3000 rpm allows to apply a dynamic load of 2.5 kN. The current practice suggests that a total time of less than 12 min per layer is adequate to obtain the maximum density. Preliminary calibration results suggested that a maximum dry unit weight close to 20 kN/m³ (i.e. total unit weight of 20 kN/m³) was feasible.

The setup of the specimens involved the following steps:

- 1 Homogenization of the field material and separation in 7 samples placed inside plastic bags, with the necessary mass to achieve the pre-assigned density in each of the seven compaction layers.
- 2 After the necessary time for humidity equalisation of the samples, determination of the “natural” water content.
- 3 Compaction of each layer inside the test cell with a compaction effort calibrated to obtain the pre-assigned density (see Figure 3.2)
- 4 Closure of the cell with the top cap.



Figure 3.2 – Vibratory hammer in use during specimen compaction

The tests were performed under load control with a digital hydraulic actuator servo controlled to the measured axial load. The measured quantities and the corresponding measuring instruments were the following

- 1 Axial load (with a pressure transducer in the hydraulic actuator).
- 2 Variation of height of the specimen (with 3 LVDTs in the outer perimeter of the test cell 120° apart).

The specimens were loaded to a setting axial stress of 10 kPa and incrementally loaded to the maximum stress of 500 kPa and subsequently unloaded with the reverse sequence, in the first and third oedometer tests, and loaded to the maximum stress of 200 kPa and unloaded, in the second and fourth oedometer tests.

The loading steps in the first and third tests were the following (kPa): 10, 100, 200, 300, 400, 500, 400, 300, 200, 100, 0. The loading steps in the second and fourth tests were the following (kPa): 10, 100, 200, 0.

The specimens were flooded at the end of the 200 kPa loading phase in first, second and fourth tests, and at the end of 500 kPa loading phase in the third test. During the flooding stage the height variation of the specimen and the load were recorded twice daily.

Each loading phase lasted 24 h. The variation of specimen height was measured immediately after the load step and at approximately the following elapsed times: ¼ min, 1 min, 2 ¼ min, 4 min, 6 ¼ min, 9 min, 12 ¼ min, 16 min, 36 min, 64 min, 2 hours, 4 hours, 8 hours and 24 hours.

The axial stress effectively applied to the specimens was computed by subtracting the measured external axial force from the compliance axial force of the cell. The later was determined through a previously calibrated law relating the axial compressive force to cell deformation during a void cell test both during loading and unloading phases.

The second and the fourth tests were followed by a vibration test at specific peak vertical accelerations (approximately 0.3 g in the second test and 0.2 g in the fourth test). After unloading, the specimen inside the cell was transported and set into a thick rubber plate. The top cap was removed and the rings were properly fixed. At the top of the specimen, rigid plates with diameter slightly smaller than the diameter of the specimen, and of the previously described vibratory rammer were placed (Figure 3.3).

The mass of the cell without the top cap (base, rings and rods) is 129.5 kg. The mass of the rigid plate is 9.68 kg and the mass of the vibrating hammer is 45.720 kg. The static vertical stress applied before vibrating is around 7.69 kPa. The centrifuge force of the vibrating hammer at nominal frequency (50 Hz) is 2.45 kN.

Two accelerometers were installed at the top of the vibrating plate to measure the frequency and the amplitude of vibrations (Figure 3.3). A piezoelectric type 626B13 PCB accelerometer with $\pm 5g$ reading range, frequency range from 0.2 to 6000 Hz and a sensitivity of ($\pm 5\%$) 1000 mV / g was used. The acquisition system consisted of a modular NI-SCXI 1000 DC chassis, where an NI-SCXI 1531 module was installed to connect to the accelerometers. This system was connected to a computer via a NI-USB

6251 card that multiplexes and digitizes the signals coming from the chassis. The readings of the measuring devices were carried out automatically, using software specially developed for this purpose (LNEC-SPA DAQmx).

The vibration was applied on the top of the sample (vibratory plate) during 3 hours and the induced acceleration response measured at the top plate. The vibration was stopped after 10 min, 30 min, 1h, 2h and 3h for measuring the vertical displacements of the rings assembly and of the top plate in relation to the rings assembly.



Figure 3.3 – View of the cell with the rigid plate and vibratory hammer at the top, and measuring devices

3.2 Test results

3.2.1 First test

The specimen for the first oedometer test was prepared following the procedure described in 3.1. The initial values of dimensions, water content and total and dry unit weight are summarized in Table 3.1.

Table 3.1 – 1st test: physical and geometrical data of specimens

	H (mm)	V (cm ³)	M (g)	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
1 st test	472.5	92775.4	191089	0.7	20.21	20.07

The Figure 3.4 displays the axial deformation against time during the load increments of 100 kPa and 200 kPa, the five days long flooding phase under a vertical nominal stress of 200 kPa, the subsequent three load increments and finally the four unloading steps. A detailed representation of the same information may be found in Figure 3.5 and Figure 3.6, which display the mean value of axial displacements measured by the three LVDTs against time during each of the five loading increments and each of the four unloading steps.

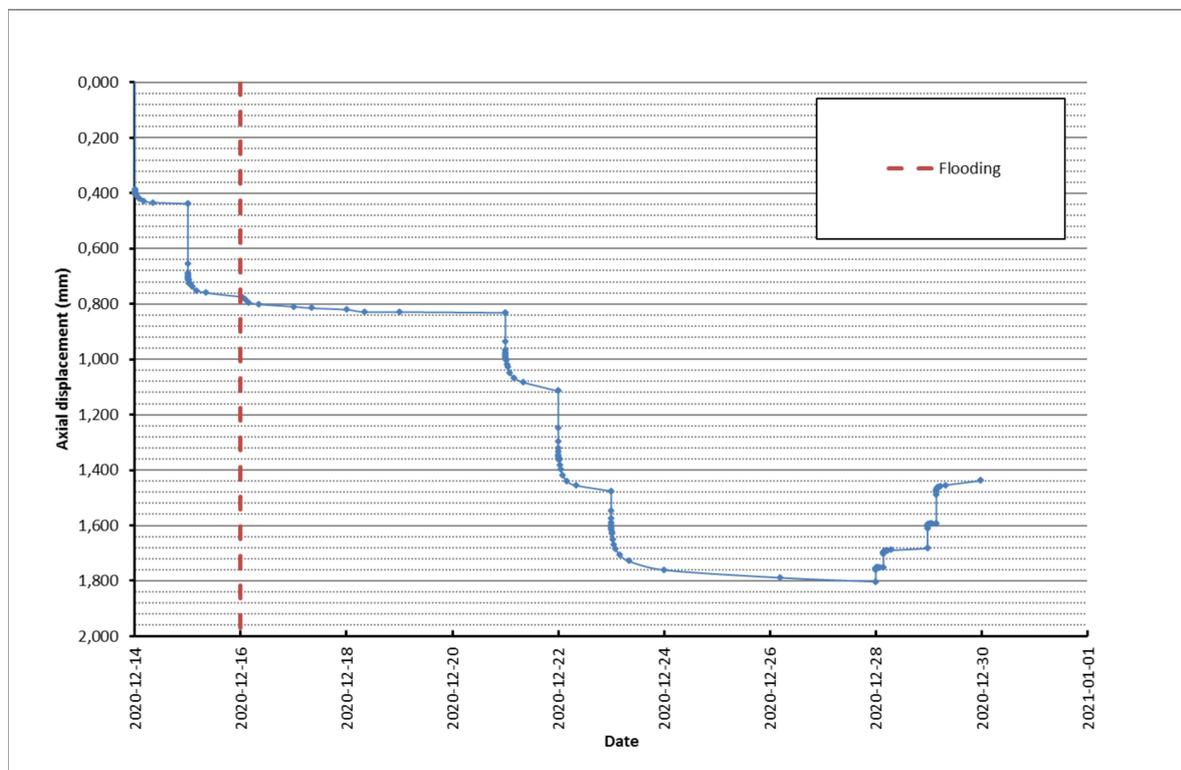


Figure 3.4 – 1st test: axial displacement *versus* time, including two loading steps, flooding phase, two additional loading steps and four unloading steps

In Figure 3.7, the stress-strain response of the specimen is displayed during the load increments and unloading phases. The grain-size distribution curve of the material upon test completion is shown in Figure 3.8.

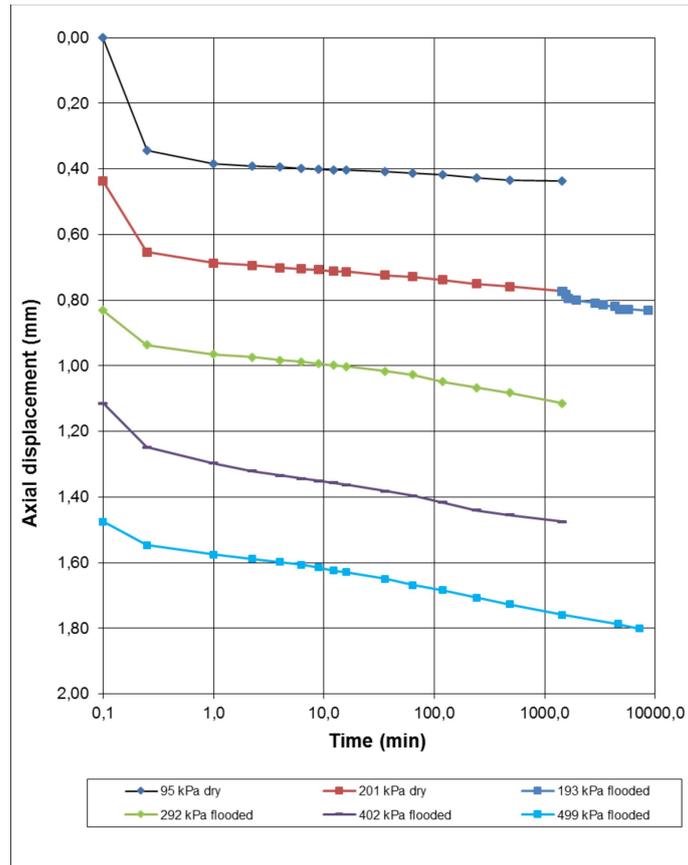


Figure 3.5 – 1st test: axial displacement versus time during the five loading steps

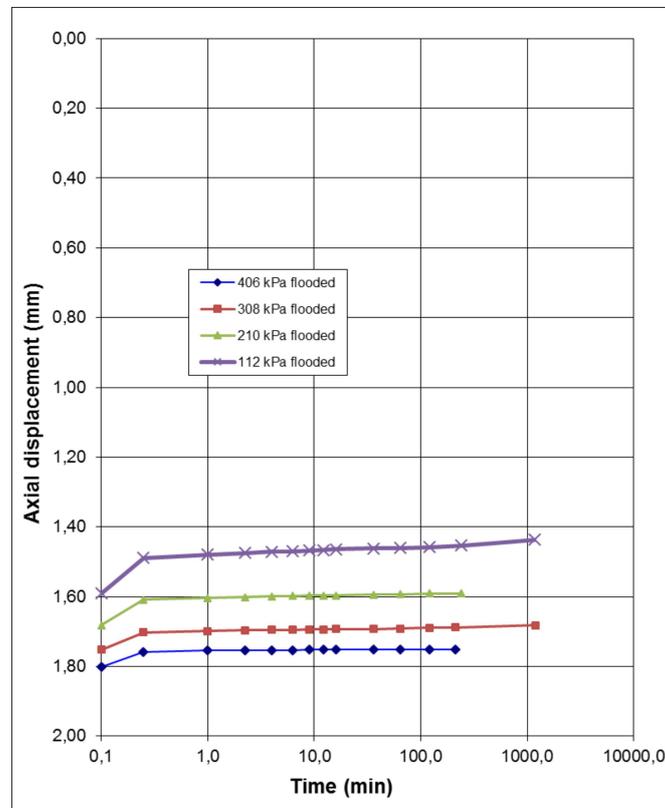


Figure 3.6 – 1st test: axial displacement versus time during the four unloading steps

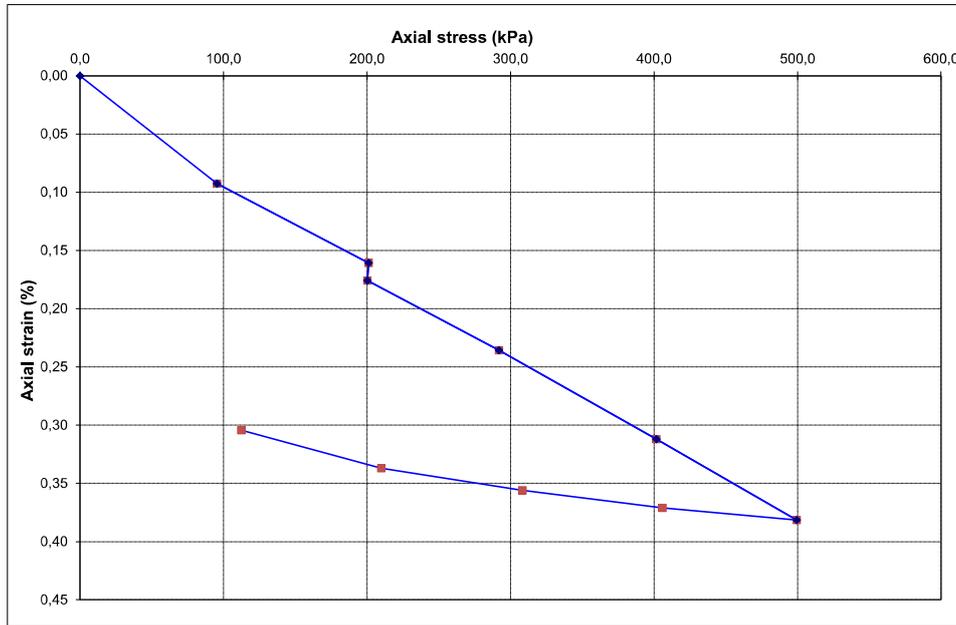


Figure 3.7 – 1st test: axial strain versus axial stress

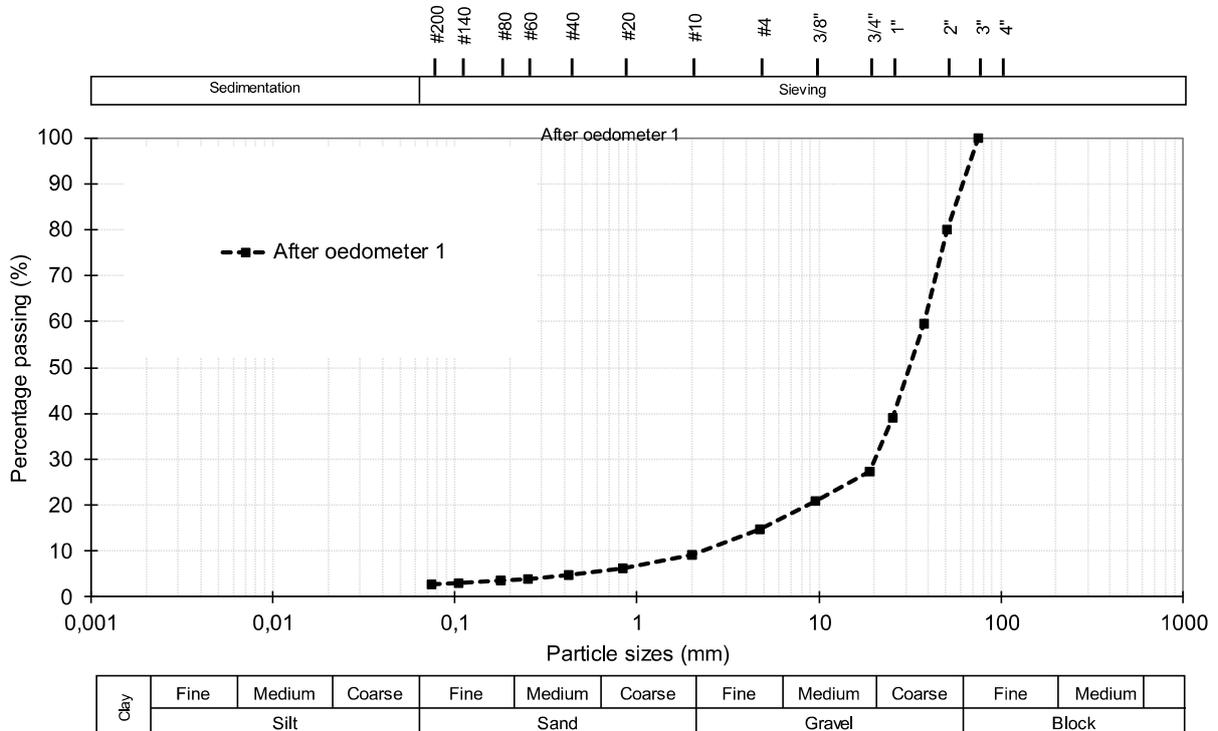


Figure 3.8 – 1st test: after test particle-size distribution curve

3.2.2 Second test

The specimen for the second oedometer test was prepared following the procedure described in the previous section. The initial values of dimensions, water content and total and dry unit weight are summarized in Table 3.2.

Table 3.2 – 2nd test: physical and geometrical data of specimens

	H (mm)	V (cm ³)	M (g)	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
1 st test	481.0	94444,4	200038	1.0	20.78	20.57

Figure 3.9 displays the axial deformation against time during the load increments to 100 kPa and 200 kPa, and the 24 hours long flooding phase under a vertical nominal stress of 200 kPa. A detailed representation of the same information may be found in Figure 3.10, which displays the mean value of axial displacements measured by the three LVDTs against time during each of the two load increments.

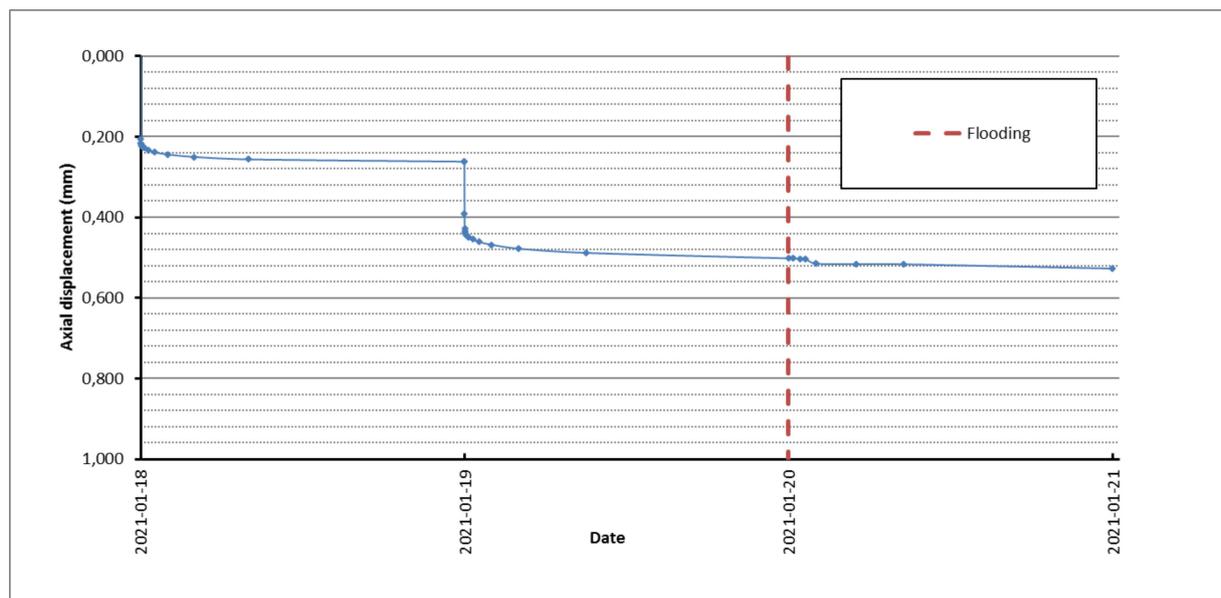


Figure 3.9 – 2nd test: axial displacement versus time, including two loading steps and flooding phase

In Figure 3.11, the stress-strain response of the specimen is displayed during the load increments.

After unloading, a vibration was applied to a rigid plate at the top of specimen during 3 hours, and the frequency, the peak acceleration, the peak velocity and the peak displacement were measured at the top of the rigid plate at approximately the following elapsed times: 0, 7, 15, 30, 60 and 90 minutes. Table 3.3 presents the values measured during vibration.