

Travaux de sécurisation de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques : retour d'expérience sur le suivi géotechnique d'exécution, sa supervision et son contrôle

Works to secure the Rhône levee between Beaucaire and Fourques: feedback on the geotechnical monitoring of execution, its supervision and control

D. Chaussée¹, C. Delaunay², V. Perset³, T. Mallet⁴, P. Mercier⁴

¹ SUEZ Consulting, Aix en Provence, denis.chaussee@suez.com

² SCP, Aix en Provence, christophe.delaunay@canal-de-provence.com

³ CEBTP, Montpellier, v.perset@groupe-cebtp.com

⁴ SYMADREM, Arles, thibaut.mallet@symadrem.fr

⁴ SYMADREM, Arles, pascal.mercier@symadrem.fr

Résumé

Les travaux de sécurisation de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques s'inscrivent dans le cadre du Plan Rhône. Ils ont débuté en septembre 2016 et ont été achevés fin 2018. Ils consistent en la réalisation d'une digue résistante à la surverse de 5 km, calée à la crue centennale et d'une digue de 8 km dite « millénale », calée 50 cm au-dessus de la crue millénale. Le mode de construction retenu consiste à démonter par plot glissant la digue existante en limons puis remettre en œuvre ces matériaux triés en contrôlant strictement leur teneur en eau et leur densité. Le volume manquant est complété avec des limons d'apport issus de zones d'emprunt préalablement identifiées et caractérisées. Les travaux de reconstruction du corps de digue en limons compactés se sont achevés en avril 2018 sur le tronçon millénal. L'article se concentre sur le corps de digue étanche de ce tronçon, dont le volume représente 540 000 m³ mis en œuvre sur 5 mois. La bonne connaissance et le zonage préalable du gisement, le contrôle de la teneur en eau et de la densification du matériau lors de sa mise en œuvre constituent les étapes clé de cette phase de travaux. Après un rappel des composants de l'ouvrage, des fonctions associées et des critères de conformité, l'article décrit l'organisation du suivi géotechnique imposé aux entreprises (G3), de sa supervision et son contrôle assurés par le maître d'œuvre et le contrôle extérieur / G4. L'article présente, du point de vue du maître d'œuvre et du contrôle extérieur / G4, les enjeux de la supervision et du contrôle du suivi pour garantir le respect des critères de conformité en maintenant des cadences élevées nécessaires au respect du planning d'opération.

Mots-Clés

Digue, suivi géotechnique, gisement, densité, teneur en eau

Abstract

The work of securing the Rhone levee between Beaucaire and Fourques began in September 2016 and will be completed by the end of 2018. The method of construction used consists of dismantling the existing levee and then reworking these sorted materials while controlling strictly their water content and density. The missing volume is completed with supply silts from previously identified and characterized borrow pits. In April 2018, work on rebuilding the levee body with compacted silt was completed on the section unprotected at the overflow. The article focuses on this section of 8 km, the volume of the impermeable core represents 540 000 m³ implemented over 5 months. The knowledge and prior zoning of the deposit, the control of the water content and the densification of the material during its implementation are the key stages of this phase of work. After a reminder of the components of the structure, associated functions and compliance criteria, the article describes the organization of geotechnical monitoring imposed on companies (G3 mission according NF P94-500 standard), its supervision and control by the project manager and external control / G4 mission. The article presents, from the point of view of the main contractor and the external control / G4, the stakes of the supervision and the control of the geotechnical follow-up to guarantee the respect of the conformity criteria while maintaining high rates of implementation necessary to the respect of the schedule of operation.

Key Words

Levee, geotechnical monitoring, deposit, density, water content

Introduction

Les travaux de sécurisation de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques ont débuté en septembre 2016 et s'achèveront fin 2018. SUEZ Consulting (anciennement SAFEGE) assure, pour le compte du SYMADREM, la maîtrise d'œuvre (MOE) complète des travaux. Le groupement GINGER CEBTP / Société du Canal de Provence (SCP) assure la mission normalisée G4 à laquelle a été ajoutée une mission de contrôle extérieur permettant :

- la réalisation, à la demande du maître d'œuvre, d'essais contradictoires aux essais réalisés dans le cadre de la mission G3 assurée par l'entreprise titulaire du marché de travaux ;
- la réalisation, à la demande du maître d'œuvre, d'audit du laboratoire de chantier.

Les missions G1 et G2 ont été réalisées en phase conception par le groupement SUEZ Consulting (anciennement SAFEGE) / GINGER CEBTP.

L'article traite du tronçon millénal (non protégé à la surverse) d'un linéaire de 8 km et dont les travaux se sont achevés en avril 2018.

Le groupement d'entreprises VALERIAN / BERTHOULY est titulaire du marché de travaux. Le laboratoire géotechnique de l'entreprise VALERIAN a porté la mission G3. Un laboratoire de chantier a été mis en place sur site intégrant l'ensemble des équipements permettant de réaliser les essais prévus au plan de contrôle à l'exception des mesures de teneur en matières organiques externalisées au laboratoire Eurofins.

Conception de l'ouvrage : composants et fonctions et méthodologie de construction du corps de digue

La digue existante est constituée d'un corps en limons, de nombreuses fois rehaussés et mis en œuvre avec les moyens techniques disponibles à chaque époque de travaux. Des perrés maçonnés ainsi que des chaussées pavées sont présents dans le corps de digue sur de nombreux tronçons.

Le mode de réalisation retenu pour l'ouvrage projeté est basé sur les principes suivants (Cf. Figure 1 et photo ci-dessous) :

- Démontage, tri des matériaux, reconstruction avec ajout d'une clé d'étanchéité en fondation et rehausse du corps de digue en limons assurant la fonction étanchéité (1) ;
- Mise en œuvre d'un complexe filtre / drain sur le talus aval assurant les fonctions filtrations et drainage (2) ;
- Mise en œuvre sur le talus aval d'une recharge (3) assurant la stabilité au soulèvement du filtre drain en cas de dysfonctionnement de l'étanchéité.

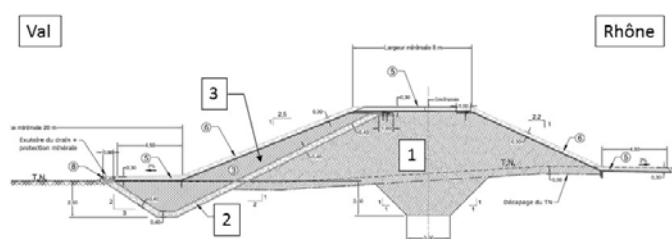


FIGURE 1 : COUPE TYPE ET PHOTO – TRONÇON NON RESISTANT A LA SURVERSE

Le gisement constitué par la digue existante présentant un état hydrique sec à très sec, l'incorporation d'eau avant compactage a été indispensable et a été réalisée au moyen d'une enfouisseuse à griffes et d'un malaxeur pour l'homogénéisation de la teneur en eau.

L'atelier type de terrassement pour la reconstruction du corps de digue était donc constitué :

- D'une pelle dite de production : dédiée au déblai et au tri des matériaux de la digue existante ;
- De tombereaux dédiés au transport des terres entre le plot de déblai et la zone de mise en remblai en nombre adapté à la distance de transport (en moyenne 2 à 3 unités) ;
- D'un boteur à chenille pour le régalage en couche des matériaux ;
- Un tracteur agricole avec arroseuse et enfouisseuse à griffes ;
- Un malaxeur ou pulvimixeur assurant l'homogénéisation de la teneur en eau dans la couche à compacter ;
- Un compacteur à pied dameur type VPM5.

Organisation du suivi géotechnique imposé à l'entreprise (mission G3)

La mission normalisée G3 (NF-P-94 500) est confiée à l'entreprise. Elle comprend deux phases interactives : l'une en phase étude d'exécution qui permet le dimensionnement détaillé des ouvrages géotechniques ; la seconde en phase de réalisation qui permet le suivi en continu de la construction et le contrôle de la cohérence des paramètres contrôlés avec les hypothèses de conception.

Phase étude : zonage détaillé du gisement

L'objectif principal de cette campagne est le zonage des gisements constitués par la digue existante d'une part et par les diverses zones d'emprunt potentielles d'autre part.

Outre le maillage adapté des sondages (pelles mécaniques, carottages, CPT...), la campagne a donc notamment consisté en la réalisation de 184 essais d'identification GTR, de 791 mesures de teneur en eau naturelle, de 144 teneurs en matière organique et de 115 essais Proctor.

Ainsi, au terme de cette phase, le linéaire de digue à déconstruire et les zones d'emprunt ont fait l'objet d'une sectorisation en une dizaine de zones possédant chacune des caractéristiques homogènes en termes de classification GTR, de teneur en eau et de valeurs Proctor. Sur l'ensemble du chantier, les valeurs Proctor mesurées en phase G3 sont synthétisées dans le tableau ci-après :

TABLEAU 1 : SYNTHÈSE DES RÉFÉRENCES PROCTOR

	W_{opn}	$\gamma_{\text{d}_{\text{opn}}} \text{ (t/m}^3\text{)}$
Moyenne	19,6 %	1,64
Écart-type	2,6 %	0,06
Min	13,5 %	1,49
Max	26,2 %	1,81

Ces essais ont permis de déterminer, au sein de ces différentes zones :

- les objectifs Proctor* (densité et teneur en eau) à prendre en compte et à respecter lors de la mise en œuvre de ces matériaux pour la nouvelle digue,
- les quantités d'eau à apporter (ou à extraire par aération) pour amener les matériaux à l'état hydrique optimal.

Les valeurs de référence retenues pour une zone correspondent à la moyenne des valeurs de la zone après exclusion des valeurs jugées non représentatives.

(*) : *On rappellera que les essais PROCTOR normal définissent une plage de teneur en eau de mise en œuvre d'un matériau permettant d'atteindre le taux de densification visé, pour une énergie de compactage donnée. Le protocole de l'essai PROCTOR normal suit la norme NF P 94 093.*

Phase suivi : Contrôle de la mise en œuvre du corps de digue étanche

Ce contrôle est réalisé par le laboratoire de l'entreprise VALERIAN. Le plan de contrôle prévisionnel a été défini par le maître d'œuvre (SUEZ Consulting) et la mission G4 (GINGER CEBTP / SCP) sur la base de retour d'expérience de chantiers comparables. Il permet au regard :

- des volumes à mettre en œuvre (540 000 m³ de limons sur 8 km)
- et des cadences envisagées (5 000 à 7 000 m³ par jour),

de disposer d'une bonne vision de la compacité et de la teneur en eau à la mise en œuvre du matériau, avec 1 couple de valeur pour 600 à 700 m² de couche de corps de digue.

Le plan de contrôle a été précisé avec l'entreprise en fonction de l'organisation de la mission G3 et consiste en :

- 1 mesure de teneur en eau tous les 200 m³ de matériaux mis en œuvre ;
- 1 mesure de densité in-situ au gamma-densimètre tous les 200 m³ de matériaux mis en œuvre
- 1 pénétromètre dynamique léger tous les 40 ml sur 1 m de profondeur afin de contrôler la compacité de 3 couches et leur bon mariage
- 1 essai Proctor tous les 2 500 m³ mis en œuvre, soit un à deux essais par jour
- 1 identification GTR tous les 2500m³ mis en œuvre avec mesure de la teneur en matière organique.

Ces essais réguliers ont pour objectif de vérifier l'éventuelle variabilité du gisement au sein d'une zone et de contrôler la qualité de la mise en œuvre du matériau selon la procédure détaillée ci-après et en figure 4.

La réalisation des essais dans un laboratoire dédié, sur la base vie du chantier facilite la réactivité des équipes en cas d'anomalie ou de non-conformité. Cette proximité permet à l'entreprise de reprendre, dans un laps de temps réduit, une couche non conforme, et ce bien avant qu'elle soit éventuellement recouverte par d'autres couches.

Organisation de la supervision du suivi géotechnique

Par la mission G4 et le contrôle extérieur (assuré par GINGER CEBTP / SCP)

La mission comprend six volets :

- L'établissement d'un avis sur les documents émis par l'entreprise : les études d'exécution G3 ainsi que les comptes rendus d'essais hebdomadaires sont analysés d'un point de vue géotechnique. Une proposition de visa (Visé Sans Observation, Visé Avec Observation, Vu A Resoumettre) est alors suggérée au MOE pour chaque document.
- Le suivi des planches d'essai destinées à valider les

procédures de mise en œuvre des matériaux, avec l'assistance technique et la réalisation d'essais contradictoires.

- La participation, à la demande du MOE, aux réunions de chantier traitant plus particulièrement des aspects géotechniques.
- Les audits du laboratoire de l'entreprise et la réalisation d'essais inter-comparés afin d'homogénéiser les procédures et caler relativement les appareillages.
- Le contrôle de la mise en œuvre des matériaux de la digue au moyen d'essais complémentaires ou contradictoires à ceux de l'entreprise (contrôle extérieur). Le logigramme du déroulement d'une intervention sur site est illustré par la figure 1.
- Les diagnostics géotechniques (mission normalisée G5) sur des aspects spécifiques (ouvrages traversants, tassements, ...).

d'intervention rapides ainsi que sur des temps de réalisation d'essais et d'analyse des résultats compatibles avec les cadences annoncées. Avant même la rédaction du PV par le contrôle extérieur, tout essai ou série d'essais anormal ou non conforme a été immédiatement signalé au MOE et à l'entreprise afin de stopper les travaux sur la zone et le cas échéant, programmer une nouvelle campagne de mesures. Ces anomalies ou non conformités sont tracées et les mesures prises par l'entreprise également tracés en réponse dans un tableau de synthèse.

Les fréquences interventions de la mission G4 ont été définies avec le MOE en fonction des cadences de l'entreprise :

- Cadence "normale" : 1 intervention par semaine
- Cadence "élevée" : 2 interventions par semaine

Plusieurs contrôles inopinés ont été effectués soit en section courante, soit sur des points spécifiques (station de pompage, ouvrages traversants...).

Par le Maître d'œuvre

Le maître d'œuvre est le garant du bon respect des exigences fixées au CCTP. Chaque semaine, sur la base de l'avis du G4 / Contrôle extérieur il vise le rapport hebdomadaire de suivi émis par l'entreprise et valide la section mise en œuvre au cours de la semaine. Au regard des cadences importante et dans un souci de fluidité indispensable au bon déroulement du chantier, dès qu'une anomalie ou une non-conformité a été détectée par le contrôle extérieur, une communication directe avec le maître d'œuvre et l'entreprise était déclenchée. Dans la majeure partie des cas rencontrés l'anomalie ou la non-conformité a été immédiatement traitée par l'entreprise.

La réalisation de manière systématique et à une fréquence relativement importante de contrôles extérieurs permet au maître d'œuvre de disposer d'un levier fort sur l'entreprise.

Les enjeux de la supervision et du suivi géotechnique

La densification du limon utilisé en corps de digue pour assurer la fonction étanchéité constitue une étape clé de la construction de l'ouvrage et de sa durabilité. De plus, la résistance à l'érosion du matériau est étroitement liée au bon respect de la teneur en eau lors de la mise en œuvre, de l'énergie de compactage et de l'épaisseur de couche.

Afin de disposer des conditions climatiques les plus favorables et de respecter les contraintes liées à la gestion du risque de crue et de la continuité de la protection, les travaux de construction du corps de digue ont été concentrés entre mai 2017 et septembre 2017. Le volume mis en œuvre sur les 8 km du tronçon de digue millénal représentant 540 000 m³, la cadence moyenne s'est établie entre de 5 000 et 7 000 m³ par jour.

L'enjeu principal de cette phase de travaux pour le maître d'œuvre et la mission G4 a été de pouvoir s'assurer :

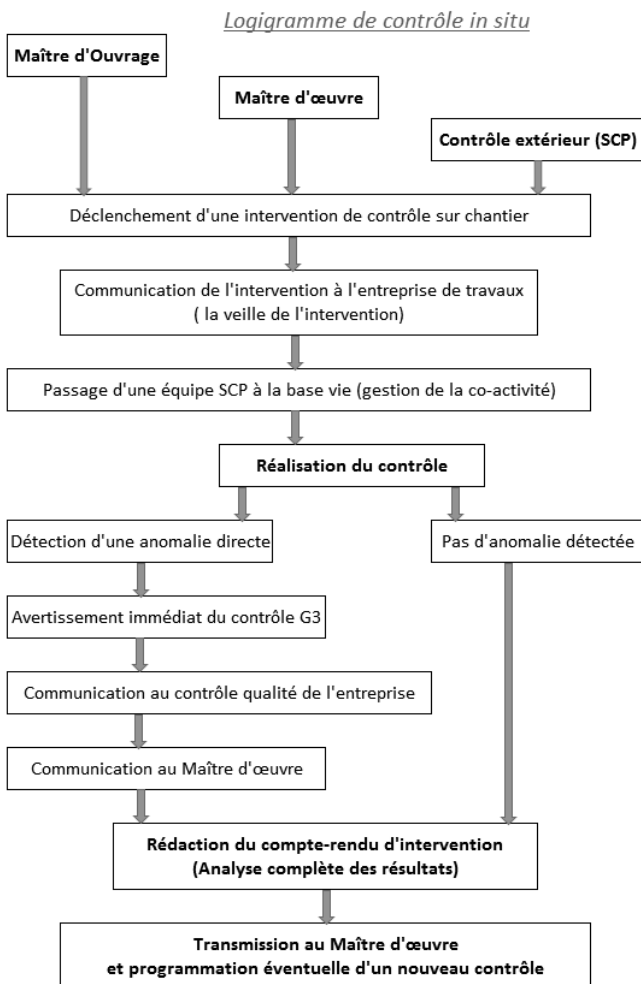


FIGURE 2 : LOGIGRAMME DU CONTROLE IN-SITU

Avec le même souci de réactivité que l'entreprise, la mission G4 / Contrôle extérieur s'est engagée sur des délais

- du bon respect des objectifs de teneur en eau et de densité garant d'un ouvrage de qualité et durable ;
- du bon respect des délais et des contraintes de continuité de la protection, critique en automne lors des périodes de crue cévenoles.

Malgré la finesse du zonage préalable de la digue à déconstruire, de la clé d'étanchéité et des zones d'emprunt, des variations latérales et verticales de faciès ont été observées au sein d'une même zone (limons plus sableux ou plus argileux).

Ces variations de faciès avaient pour conséquence de faire varier la référence Proctor réelle par rapport à la référence Proctor retenue pour la zone. Cet élément a également été pris en compte dans la procédure de contrôle.

Objectifs de compactage et critères de conformité

Les objectifs de teneur en eau et de compactage fixés au CCTP ont été légèrement adaptés à l'issue des planches d'essais réalisées en début de chantier.

Les seuils d'acceptabilité ou de tolérance ont été formalisés pour intégrer au plan de contrôle les valeurs isolées ou non-représentatives mesurées en deçà des objectifs fixés.

In fine pour la teneur en eau (W%), le contrôle a été jugé conforme si la teneur en eau W% était comprise entre Wopn et Wopn+3% avec une tolérance de moins de 20 % des mesures comprises entre Wopn et Wopn-1%. En règle générale, et selon les recommandations du Guide des Terrassements Routier (GTR), il est préférable de mettre en place les remblais limoneux A₁ à l'état hydrique "m" or la résistance à l'érosion du limon est meilleure si le matériau est mis en œuvre à l'état hydrique "m" proche de l'état "h" voire au début du domaine "h", d'où cette plage.

Les essais ont été considérés comme acceptables dans les cas ci-après :

- Lorsque la moyenne des teneurs en eau réalisées sur une journée restait dans la plage Wopn-Wopn+3% avec moins de 20 % des valeurs comprises entre Wopn+3% et Wopn+4% (ex : Wmoy = Wopn+2,5% et moins de 20 % des essais entre Wopn+3% et Wopn+4%),
- Lorsque le faible nombre d'essais lors de journées de faible production influait fortement sur le pourcentage (ex : 1 essai compris entre Wopn et Wopn-1 sur 3 essais réalisés).

Pour le taux de compacité ($T_x = \gamma_{d_{\text{mesuré}}} / \gamma_{d_{\text{opn}}}$), le critère de conformité est l'obtention de 100 % des mesures avec un taux supérieur à 95 % de l'OPN (correspondant à un objectif de compactage q4).

Les essais de compacité ont été considérés comme

acceptables :

- Lorsque la moyenne des compacités restait > 95% de l'OPN avec quelques valeurs isolées comprises entre 92 et 95 %
- Lors des journées à faible production, lors desquelles la représentativité des résultats était à relativiser par rapport au nombre d'essais effectués (ex : 1 essai < 95 % sur 3 essais réalisés).

Pour les essais au pénétrromètre dynamique léger, il a été confirmé dès les planches d'essais que les courbes de référence de la bibliothèque du pénétromètre ne correspondaient pas à la réalité des densités mesurées sur site.

En effet, pour des densités mesurées sur site au gamma-densimètre ou à la JED* bien supérieures à q4, les pénétrogrammes fournissaient systématiquement des courbes très proches de la courbe limite Q_L. De plus, le fait d'accepter des valeurs de teneur en eau jusqu'à Wopn+3% génèrait une incertitude liée à l'état hydrique du matériau qui pouvait passer de moyen « m » à humide « h », entraînant de fait une variabilité des courbes de référence de la résistance dynamique Q_L et Q_R pour un objectif q4. Fort de ce constat et pour être en adéquation avec les spécificités des matériaux du site, il a donc été convenu de tenir compte des critères d'anomalies automatiquement générés par le logiciel de traitement qu'à titre informatif et d'analyser individuellement chaque pénétrogramme. L'essai a été considéré comme conforme lorsqu'il répondait à la triple condition suivante :

- Épaisseur de moins de 15 cm par couche < Q_L
- Moins de 15% du sondage < Q_L
- Pas de valeurs de résistance de pointe < 1 MPa

Il est considéré comme Non conforme dans les autres cas.

Les figures ci-dessous illustrent des pénétrogrammes conformes et non conformes réalisés par le contrôle extérieur.

Contrôle de compactage au pénétromètre dynamique à énergie variable norme NF P94-105

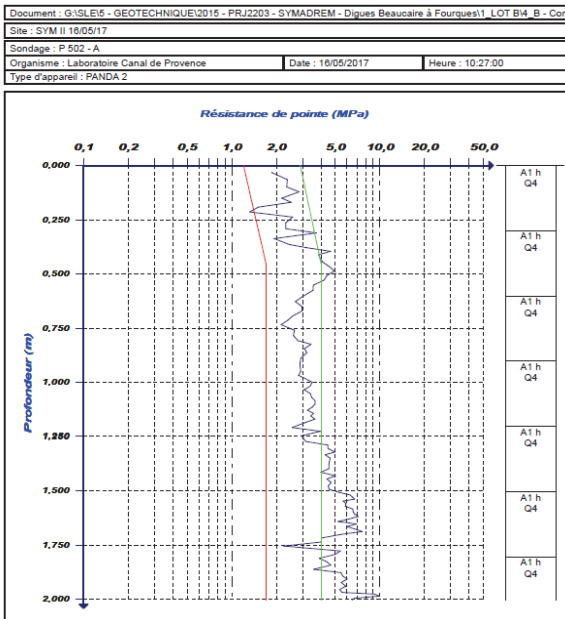


FIGURE 3 : EXEMPLE DE PENETROGRAMME CONFORME

Contrôle de compactage au pénétromètre dynamique à énergie variable norme NF P94-105

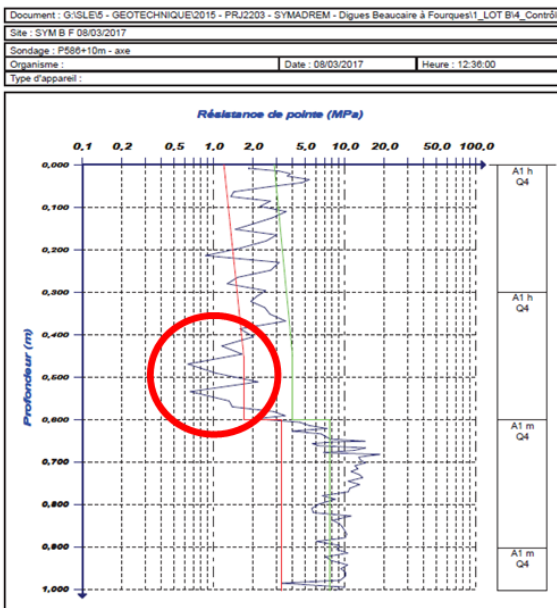


FIGURE 4 : EXEMPLE DE PENETROGRAMME NON CONFORME

Pour les trois types d'essais réalisés à l'avancement sur le chantier, la définition préalable d'objectifs réalistes et le strict encadrement des tolérances ont permis d'identifier rapidement les anomalies ou les non conformités.

(*) : La Jauge Electrique de Densité (JED) est un dispositif de mesure des propriétés de polarisation d'un sol soumis à un champ électrique entre des électrodes plantées dans la couche à tester. L'exploitation du signal, par régression et comparaison avec un "modèle de sol" réalisé en début de chantier, permet de déterminer lors d'une même mesure la teneur en eau, la densité et le taux de compacité. Cet appareillage présente l'énorme avantage de ne pas utiliser de source radioactive. Des essais inter-comparés avec le gamma-densimètre ont été réalisés lors des planches d'essai et tout au long du chantier.

Procédure de contrôle du compactage et de la teneur en eau

Les essais sur site ont été effectués sur chaque zone de mise en œuvre (parfois jusqu'à 4 ateliers distincts) et à la fréquence définie dans le plan de contrôle. Les mesures ont été réalisées de façon systématique par le laboratoire de l'entreprise dans le cadre de son autocontrôle, mais aussi par la mission G4 (contrôle extérieur) ou parfois par les deux laboratoires (contrôles contradictoires).

Sur la zone d'essais ont été réalisés simultanément :

- des mesures de densité en place au gamma-densimètre (ou à la JED),
- des prélèvements pour des mesures de teneur en eau à l'étuve,
- des sondages au pénétromètre dynamique léger.

Les mesures de teneur en eau à l'étuve ont eu pour double fonction :

- de vérifier la conformité du critère W% au droit des prélèvements,
- de déterminer la teneur en eau moyenne du secteur afin de vérifier la cohérence avec les valeurs obtenues au gamma-densimètre ou à la JED et, le cas échéant de procéder à leur rétro-calage.

La procédure de contrôle du compactage sur site s'est appuyée, dans un premier temps, sur les **valeurs Proctor de référence** de la zone d'emprunt, définies en phase G3-études. En parallèle, de nouveaux échantillons ont été prélevés sur la zone d'emprunt pour des analyses GTR, des mesures de la teneur en matière organique et un essai Proctor (désigné "**Proctor du jour**").

Les mesures de densité en place ont été calées par rapport aux valeurs Proctor de Référence (γ_{dopn} et W_{opn} de référence).

Ce sont ces valeurs moyennes et représentatives de la zone d'emprunt qui ont été utilisées pour calculer le taux de compactage puis vérifier le respect des 95 % de l'OPN et la conformité de la plage de teneurs en eau. Si les valeurs

mesurées étaient conformes aux critères (ou acceptables), la couche a été considérée conforme. Le cas échéant, les taux de compactage étaient recalculés avec les valeurs du "Proctor du jour" si elles différaient sensiblement des valeurs de référence. Dans le cas d'essais toujours hors tolérances, la couche était considérée non-conforme. Dès lors, des actions correctives étaient proposées par l'entreprise ou imposées par le MOE, ces actions sont décrites ci-après.

Outre ces mesures de densité en place, les sondages au pénétromètre léger, réalisés toutes les 3 couches, ont permis de vérifier :

- le critère densité par comparaison avec la courbe limite Q_L , l'homogénéité verticale du compactage,
- l'absence de discontinuité inter-couche,
- l'absence d'éléments grossiers au sein des limons,
- le respect des épaisseurs des couches...

De plus :

- Le ratio Q/S (en m^3/m^2) a été quotidiennement calculé pour chaque compacteur. Cette valeur, dans laquelle

Q est le volume de sol compacté pendant un temps donné, et S la surface balayée par le compacteur pendant le même temps, représente l'épaisseur d'un matériau donné que peut compacter l'engin pour obtenir la compacité recherchée ; à ce titre, elle pourrait être dénommée "épaisseur unitaire de compactage". Le critère de conformité pour ce paramètre a été fixé à $(Q/S \text{ objectif}) / (Q/S \text{ réalisé}) > 1$.

- Les enregistrements des tachygraphes de chaque compacteur ont été analysés quotidiennement afin de vérifier que la vitesse réelle était conforme à la vitesse validée en planche d'essai (3 km/h).
- Des essais au pénétromètre dynamique lourd (27 unités) ont été effectués en fin de chantier par le contrôle extérieur, sur toute la hauteur de la digue et de la clé (soit plus de 7 m). Ils ont été implantés soit sur des zones où des anomalies avaient été identifiées, soit à proximité d'ouvrages singuliers, soit de façon aléatoire.



FIGURE 5 : LOGIGRAMME DE LA PROCEDURE DE CONTROLE DU COMPACTAGE ET DE LA TENEUR EN EAU

Sur l'ensemble du chantier, les ratios sont les suivant :

TABLEAU 2 : RATIOS DES CONTROLES

	W%	γ_d
Valeurs conformes	89,60%	99,2%
Valeurs acceptables	10,05%	
Valeurs non conformes	0,35%	0,8%

Les actions correctives les plus appliquées, ont été :

- L'arrosage de la couche en cas de teneur en eau trop basse (à la queue de carpe ou à l'enfouisseur) suivi d'un malaxage au pulvimixeur puis d'un nouveau compactage (à 3 reprises).
- L'aération de la couche par malaxage en cas de teneur en eau légèrement trop élevée ou aération naturelle

si l'anomalie concerne la dernière couche (à 6 reprises).

- La réalisation d'une à deux passes de compacteur supplémentaires en cas de déficit de densité (à 3 reprises).
- Le démontage de la dernière couche en cas de teneur en eau trop élevée ou démontage des 3 dernières couches en cas de mauvaise liaison inter-couches (à 6 reprises).

Pour les 8 km de digue terminés en avril 2018, le volume total de matériaux de corps de digue étanche mis en œuvre est d'environ 650 000 m³ :

Le volume total fini du corps de digue est de 540 000 m³. Toutefois l'application de la méthode du remblai excédentaire implique que les matériaux repris sur les talus lors du talutage final et utilisés en partie supérieure ou sur une section voisine sont comptabilisés 2 fois dans le volume mis en œuvre. Ce volume est de 110 000 m³.

Le suivi géotechnique a consisté en la réalisation de 14 892 essais ainsi répartis :

- 13 321 essais (89 %) réalisés par le laboratoire de l'entreprise dans le cadre de la mission G3.
- 1 571 essais réalisés par le contrôle extérieur
- 13 % ont été effectués en phase G3-études et G4-études (y compris lors des planches d'essai)
- 87 % ont été effectués en phase de suivi des travaux

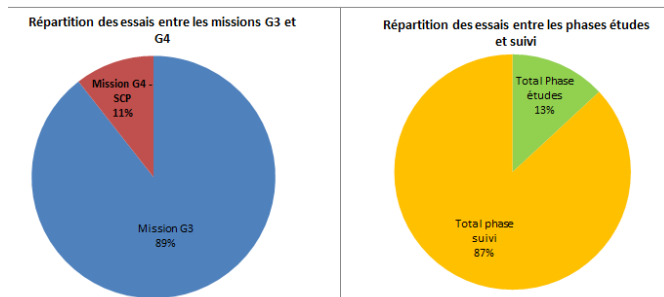


FIGURE 6 : REPARTITION DES ESSAIS GEOTECHNIQUES

Dans le détail, cela correspond à :

- Classification GTR : 551 essais
o soit 1 pour 1 180 m³ mis en œuvre
- Teneur en matière organique : 508 essais
o soit 1 pour 1 280 m³ mis en œuvre
- Proctor : 461 essais
o soit 1 pour 1 410 m³ mis en œuvre
- Teneur en eau à l'étuve : 5 645 essais
o soit 1 pour 115 m³ mis en œuvre
- Densité in situ : 5 207 essais
o soit 1 pour 125 m³ mis en œuvre
- Pénétrömètre léger : 2 472 essais
o soit 1 pour 263 m³ mis en œuvre

- Perméabilité : 48 essais
o soit 1 pour 13 452 m³ mis en œuvre



FIGURE 7: ESSAI AU PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER ET ESSAI A LA JED PAR LE CONTROLE EXTERIEUR

Le traitement des données produites par les contrôles permet d'analyser sur l'ensemble du chantier les tendances dans la distribution des paramètres : teneur en eau et densité. Les distributions des fréquences ont été calculées pour chaque paramètre pour les valeurs optimum (issues des essais PROCTOR) et pour les valeurs mesurées lors de la mise en œuvre. Les graphiques ci-dessous montrent que ces valeurs optimum et mesurées se distribuent sur des gaussiennes décalées.

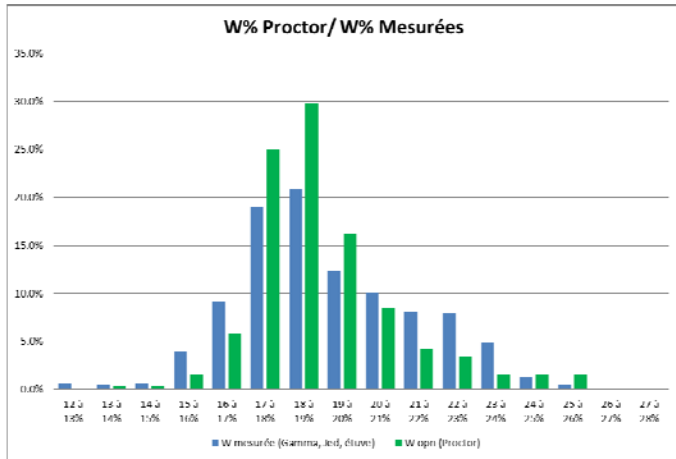


FIGURE 8 : REPARTITION DES TENEURS EN EAU

La figure 8 illustre la distribution des teneurs en eau correspondant à l'optimum Proctor (en vert) et celles mesurées au gamma-densimètre, à la JED ou à l'étuve au cours du chantier (en bleu). Ces distributions montrent que la volonté d'une mise en œuvre à l'état "m" ou début de l'état "h" se traduit, au-delà de 20 %, par une fréquence supérieure des valeurs effectivement mesurées par rapport à Wopn. Les valeurs en dessous de 16 % sont notamment celles des couches ayant fait l'objet d'actions correctives (arrosage ou démontage).

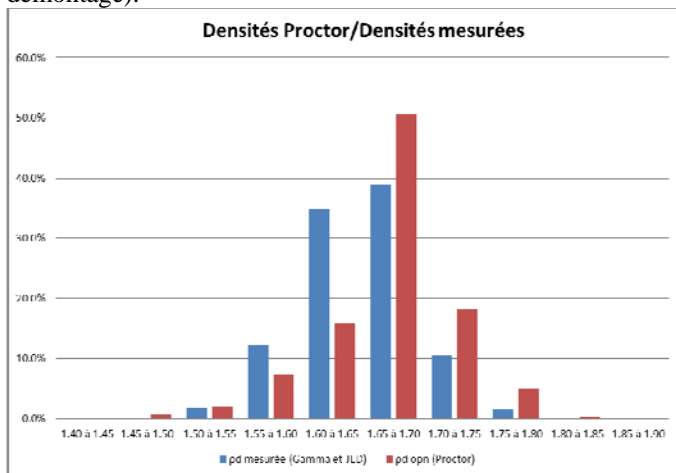


FIGURE 9 : REPARTITION DES TENEURS EN EAU

Le corolaire d'une teneur en eau volontairement supérieure à Wopn se traduit par une distribution globale des densités mesurées inférieure à la distribution des densités OPN. Toutefois le critère d'un compactage supérieur ou égal à 95% de la densité OPN a été imposé, respecté et vérifié.

Moyens et coûts

La bonne mise en œuvre de ce plan de contrôle a nécessité pour la mission G3 de suivi d'exécution la mobilisation à plein-temps de :

- 1 technicien de terrain réalisant les pénétromètres dynamiques légers, les mesures de densité et les prélèvements ;
- 1 technicien de laboratoire réalisant les essais et rapports au laboratoire de chantier
- 1 ingénieur géotechnicien assurant la supervision, la communication avec la direction de chantier et la synthèse hebdomadaire des données.

Pour la mission G4 et le contrôle extérieur, l'équipe était constituée d'un ingénieur assurant la supervision et la communication avec le MOE, et de techniciens assurant les essais in situ et au laboratoire. L'organisation et la mobilisation a été adaptée aux cadences et au planning des travaux afin d'assurer côté MOE, G4 et contrôle extérieur un contrôle continu.

Le coût total des missions G3, G4 et contrôle extérieur a représenté pour le tronçon millénal, environ 3 % du coût des travaux. La mission G3 y compris le laboratoire de chantier en représente les 2/3, la mission G4 et contrôle extérieur, 1/3.

Conclusions

L'intervention d'un contrôle extérieur adossé à la mission G4 permet au maître d'œuvre de renforcer sensiblement sa supervision des opérations délicates du chantier.

Le caractère systématique et adapté aux cadences du chantier des interventions du contrôle extérieur permet au maître d'œuvre de disposer d'un levier fort pour garantir un respect constructif du plan de contrôle et des objectifs de qualité. En effet la réactivité et la bonne communication entre tous les acteurs ont fait que les intérêts de tous ont convergé vers la mise en place des moyens adaptés pour que les anomalies soient les moins fréquentes possibles et qu'en cas d'apparition elles soient le plus rapidement traitées.

La méthode de contrôle géotechnique de l'exécution de la digue s'est avérée pertinente au regard des enjeux et du contexte de l'ouvrage.

Les principaux points positifs de cette méthode et de ce plan de contrôle ont été :

- La définition préalable d'un zonage exhaustif des emprunts affectés de caractéristiques moyennes et représentatives permettant une mise en œuvre et un contrôle sans attendre le "Proctor du jour".
- La probabilité réduite de passer à côté d'une anomalie en raison de l'important nombre d'essai.
- La prise en compte des possibles légères variations de faciès au sein d'une même zone d'emprunt.
- Le contrôle systématique de toutes les couches et des interfaces.
- La multiplicité des moyens de contrôle d'un même paramètre et les analyses croisées permettant de confirmer les résultats ou d'identifier les éventuelles dérives d'un appareil.
- La proximité et la synergie des laboratoires permettant une réactivité accrue en cas d'anomalie constatée.

De plus, le présent chantier a permis de confirmer l'intérêt des planches d'essais et des planches de vérification, qui ont notamment permis d'écarter des procédures de mise en œuvre inefficaces ou inadaptées.

Les écueils qui se sont révélés au cours du chantier ont été :

- La difficulté, pour le laboratoire de l'entreprise, de réaliser autant d'essais (notamment les Proctor journaliers) quand la cadence de mise en œuvre nécessitait 3 zones d'emprunt distinctes ou bien quand il y avait simultanément plus de 2 ateliers de compactage.
- La nécessité de contrôler les zones en horaires décalés (entre 12h et 14h ou après 17h) afin de limiter

l'impact sur l'avancement du chantier et réduire les risques liés à la co-activité.

- La rigueur nécessaire dans le repérage spatial des essais. En effet, autant il est aisé de localiser l'essai en fonction du profil (ou du Point Métrique), autant il s'est avéré délicat de se positionner en altitude.

Ce contrôle couche par couche est particulièrement aisé à appliquer quand la mise en œuvre par un atelier se fait sur une grande longueur (plus de 200 m). En dessous de cette longueur, l'obtention de certains résultats, même si elle est très rapide, peut intervenir alors que d'autres couches sont venues se superposer à la couche non conforme. Il faudra alors déconstruire les couches supérieures pour traiter la couche incriminée.

Remerciements

Les auteurs remercient Gilles DUMAS maire de Fourques, Clément PORCIERO et Jérôme BERTIN de l'entreprise VALERIAN et tous les acteurs qui ont œuvré à la bonne réussite de l'opération.

Nous avons enfin une pensée particulière pour Christophe KOPIBIDA (GINGER CEBTP) qui a œuvré à la conception du projet et nous a quitté avant la concrétisation du chantier.