



HAL
open science

Des anomalies géotechniques à l'origine de propositions d'indicateurs de durabilité pour les digues fluviales

Yasmina Boussafir, Lucile Saussaye, Eric Dissler, Edouard Durand

► To cite this version:

Yasmina Boussafir, Lucile Saussaye, Eric Dissler, Edouard Durand. Des anomalies géotechniques à l'origine de propositions d'indicateurs de durabilité pour les digues fluviales. 9èmes JNGG : Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur 2018, Jun 2018, CHAMPS SUR MARNE, France. 33 p. hal-01826424

HAL Id: hal-01826424

<https://hal.science/hal-01826424>

Submitted on 29 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DES ANOMALIES GÉOTECHNIQUES À L'ORIGINE DE PROPOSITIONS D'INDICATEURS DE DURABILITÉ POUR LES DIGUES FLUVIALES

UNUSUAL PROPERTIES OF SOILS CAN PROBABLY BECOME INDICATORS OF SUSTAINABILITY FOR RIVERS'LEVEES

Yasmina BOUSSAFIR¹, Lucile SAUSSAYE³, Eric DISSLER² et Edouard DURAND³

¹ Université Paris-Est – Ifsttar – GERS – laboratoire Sols, Roches et Ouvrages géotechnique, 77 447 Marne la Vallée Cedex 2

² Fugro GeoConsulting, 27 rue des Peupliers, 92 752 Nanterre, France

³ Cerema, Laboratoire de Blois, CS 2912, 41 029 Blois Cedex

RÉSUMÉ – La digue de La Ville-aux-Dames a été étudiée en 2014 par le bureau d'étude Fugro à la suite des préconisations des études de dangers menées par la DREAL Centre-Val de Loire. Les données géotechniques ont été exploitées en 2017 au Cerema de Blois pour identifier des propriétés pouvant devenir des indicateurs de durabilité. Il apparaît que les teneurs en eau ainsi que les masses volumiques des sols in situ peuvent constituer des indicateurs simples et robustes pour évaluer l'état des ouvrages en terre et évaluer leur durabilité.

ABSTRACT – The river Loire levee protecting La Ville-aux-Dames in France, near Tours, was studied in 2014 by Fugro, following the recommendations of the stakeholder DREAL Center-Val de Loire. The geotechnical data was used in a work conducted by the Cerema of Blois in 2017 to identify soil's properties that could be used as sustainability indicators. It appears that the water content and density of in situ soils, can be simple and robust indicators for assessing the condition of stability of earthworks and their durability.

1. Introduction

Les digues sont des ouvrages devant résister à une élévation du niveau d'eau d'origine fluviale ou maritime, pour éviter d'inonder les terres que l'on cherche à protéger. Beaucoup de ces ouvrages sont réalisés en terre, certains sont récents et construits avec des règles actualisées, d'autres sont le résultat d'un héritage historique. Les digues de Loire représentent un linéaire d'ouvrage de l'ordre de 600 km et ont été construites depuis plus de 800 ans pour résister aux crues de la Loire (Direction Régionale de l'Environnement, 1996).

Compte tenu de leur histoire, de nombreuses reconnaissances géotechniques ont été menées ces dernières années pour en connaître la composition et diagnostiquer leur état au regard des enjeux actuels. Les derniers diagnostics sont réalisés sur la base d'un référentiel technique relativement récent (Comité Français des Barrages et Réservoirs, 2015) dont une version provisoire était disponible dès 2010. Ils permettent d'examiner la stabilité des ouvrages en rapport avec 6 grands thèmes, chacun en relation avec des mécanismes potentiellement initiateurs de rupture, à savoir :

- La rupture par surverse
- La rupture par érosion interne
- La rupture par défaut de stabilité mécanique : glissement côté val, glissement côté Loire, déstabilisation générale
- La rupture par soulèvement hydraulique
- La rupture par érosion externe (affouillement)

D'autres thèmes d'analyse de la stabilité sont demandés dans les textes de référence (CFBR, 2015) comme par exemple l'analyse vis-à-vis d'un aléa sismique ou karstique.

L'article balaye les résultats d'essais et sondages obtenus sans focaliser sur les mécanismes de rupture tels qu'ils ont été analysés en 2014 mais en reprenant les éléments permettant d'apprécier l'état général de l'ouvrage en terre. Le cas d'étude réalisé sur la digue de La Ville-aux-Dames, en Indre-et-Loire (37), près de Tours, est riche en données qui permettent de mener à bien ce travail. Les données de sol présentées ci-dessous pointent des hétérogénéités au sein de formations globalement identiques, que l'on peut qualifier d'anomalies. Ces hétérogénéités sont probablement à mettre en lien avec l'âge de la levée, son histoire et le comportement des sols en fonction de leur environnement climatique. Ces nouvelles informations permettent de proposer des approches complémentaires à la pratique actuelle et permettent d'identifier des indicateurs de durabilité.

2. Les diagnostics de stabilité de la digue de La Ville-aux-Dames

La digue de La Ville-aux-Dames correspond à un linéaire d'environ 2 850 m, occupée par la route départementale RD751 (Figure 1). Elle a été étudiée en 2014 par le bureau d'étude Fugro (Fugro, 2014) suite aux préconisations des études de dangers réalisées sur le système d'endiguement de la Loire (DREAL Centre-Val de Loire, 2012). Cette digue protège le val de Tours, de classe A¹. Ce linéaire se situe plus précisément sur une partie de la levée de Tours Loire Amont (TLA), à cheval entre les communes de La Ville-aux-Dames et Montlouis-sur-Loire, la levée de TLA s'étendant de Tours à Montlouis-sur-Loire.

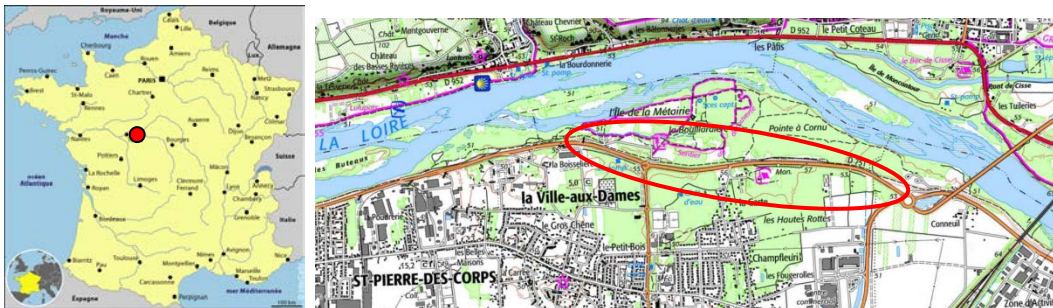


Figure 1. Localisation de la digue de La Ville-aux-Dames (en rouge)

La digue a été dans un premier temps auscultée pour définir le modèle géotechnique applicable à l'ouvrage. La digue entrant dans la catégorie des digues dites historiques (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2015), il n'existe aucun document d'archive permettant de connaître les conditions de sa construction. Les seules archives disponibles sont les études géotechniques réalisées a posteriori.

Les digues de Loire ont fait l'objet de plusieurs phases de construction et rehaussement (DRE, 1996). Leur forme actuelle est le résultat d'adaptations successives aux crues et épisodes tragiques qu'a connu le val et à la volonté collective de protéger contre le risque d'inondation et de stabiliser le lit de la Loire (DRE, 1996). Toutes les digues de Loire ont fait l'objet d'au moins trois ou quatre grandes étapes de rehaussement entre 1200 et la dernière grande crue de 1866, ce qui se traduit aujourd'hui par une structure dite "en pelure d'oignon" sur les modèles géotechniques.

¹ Population protégée par la digue supérieure ou égale à 50 000 habitants et hauteur > 1 m

La levée de TLA est donc modélisée avec deux grandes formations géotechniques superposées l'une sur l'autre : le remblai (R) et le corps de digue (CD). Leurs caractéristiques géotechniques sont récapitulées Tableau 1. Les sols supports de la levée sont constitués des alluvions de la Loire (F1 à F3). Ces informations se retrouvent dans l'interprétation du profil en long de l'ouvrage et dans le modèle géotechnique utilisé pour analyser la stabilité mécanique (Figure 2). Ce modèle intègre les données des investigations géophysiques et leur extrapolation rendue possible par l'analyse des sondages ayant fait l'objet d'une répartition stratégique (Fugro, 2014).

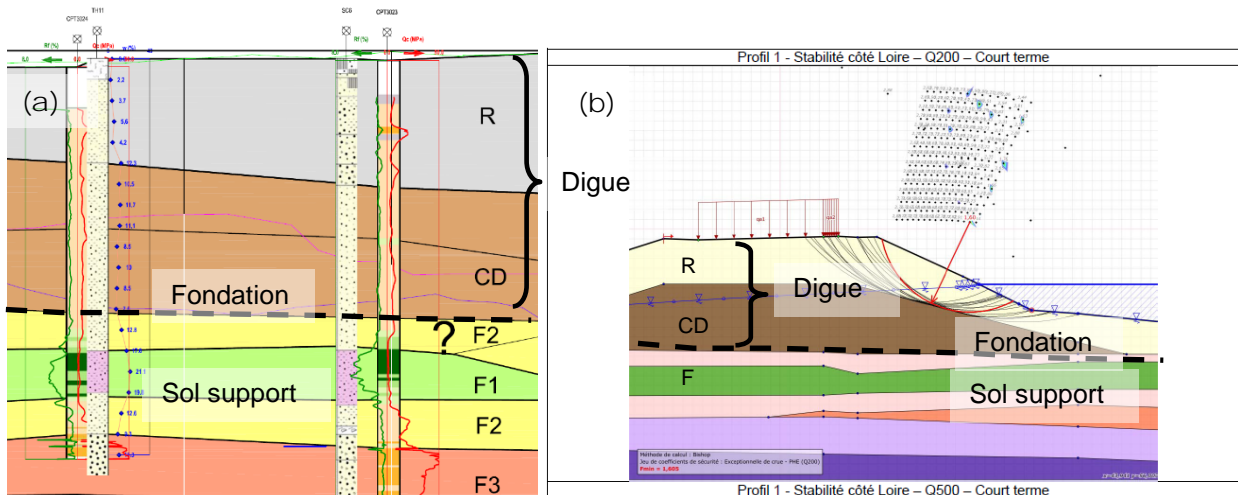


Figure 2. Représentation du modèle géotechnique pris en compte pour les digues historiques de La Ville-aux-Dames. (a) Extrait du profil en long. (b) Extrait des annexes d'analyse de stabilité sur profil en travers

2.1. Nature des sols qui composent la digue

En parallèle des investigations géophysiques, une campagne de sondages au pénétromètre statique a permis d'établir l'analyse statistique des valeurs de résistance de pointe et de frottement latéral mesurées lors du fonçage de cônes, grâce à l'utilisation des abaques de Robertson. La nature des matériaux qui composent les digues a été précisée au moyen des échantillons prélevés par sondages implantés stratégiquement en fonction des observations indirectes issues des campagnes de géophysique et de pénétromètre statique. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.

Les essais de laboratoire utilisés pour classer les sols constitutifs des digues sont les suivants :

- des analyses granulométriques (NF P94-056) complétées par des sédimentométries pour les sols fins (NF P94-057) ;
- des valeurs de bleu des sols (NF P94-068) ou des limites d'Atterberg (NF P94-051 et NF P94-052-1) pour évaluer l'argilosité ou la plasticité des sols ;
- des teneurs en eau naturelles mesurées à l'étuve (NF P94-050).

L'interprétation est faite selon la norme NF P11-300 (ou classification GTR). Cette norme très pratique en terrassement permet d'évaluer les possibilités de réemploi en ouvrage en terre. Les recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai (CFBR, 2015) rappellent que d'autres classifications existent. La pratique de la NF P11-300 est cependant majoritaire.

Tableau 1. Identification des matériaux de digue de TLA (Fugro, 2014)

	Essais réalisés (entre parenthèses, le nombre d'essais réalisés)	Formation R	Formation CD	Echantillon moyen
Essai de sol	Teneur en eau naturelle w_n (%)	2,2 à 13,7 (14)	4,1 à 14,5 (32)	-
	VBS (g bleu/100g de sol sec)	0,6 - 0,9 (2)	0,05 à 1,0 (7)	0,68
	Passant à 80 μm (%)	17 – 29 (2)	1 à 25 (7)	21,1
	Passant à 2 mm (%)	8 – 8 (2)	67 à 100 (7)	91,5
In situ	Résistance de pointe q_t (MPa)	2 à 30 (moyenne = 8,9)	1,5 à 10 (moyenne = 3,5)	
	Rapport de frottement R_f (%)	0,5 à 2 (moyenne = 1,2)	0,5 – 5 (moyenne = 1,2)	
	Classification GTR	B5	D1 – B1 – B5	B5
	Description du sol	Sable silteux	Sables et sables silteux	Limon sableux

Les essais de laboratoire utilisés pour évaluer la stabilité mécanique à la rupture ont été réalisés sur des échantillons carottés sous gaine PVC et sont :

- des mesures de masses volumiques apparentes humides (sur le sol NF P94-053) mesurées à la trousse coupante complétées par celles sur les particules solides (NF P94-054) ;
- des valeurs de cohésion effective et d'angle de frottement effectif déduits d'essais triaxiaux CD (NF P94-074).

Les résultats des essais sont récapitulés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Masses volumiques et résultat d'essais triaxiaux sur la digue de La Ville-aux-Dames (Fugro, 2014)

	Essais réalisés (entre parenthèses, le nombre d'essais réalisés)	Formation R	Formation CD
Essais mécan	Cohésion drainée c' (kPa)	-	0 (3)
	Frottement drainé φ' (°)	-	32 à 37 (3)
	essai non drainé	-	-
Essai de sol	Masse volumique humide ρ_h (t/m^3)	-	2,13 – 1,57 – 1,51
	Masse volumique sèche ρ_d (t/m^3)	-	1,91 - 1,47 – 1,40
	Masse volumique des particules ρ_s (t/m^3)	-	2,68

2.3. Situations de crues sur la Loire à La Ville-aux-Dames

L'analyse de la rupture mécanique doit être menée selon plusieurs situations de crue (CFBR, 2015) :

- En situation normale d'exploitation
- En situation rare de crue et de décrue rapide
- En situation exceptionnelle de crue et de décrue rapide
- En situation extrême de crue et de décrue rapide

Le Tableau 3 résume les cotes utilisées pour la modélisation numérique pour chacune des situations. Ces cotes sont issues des études de dangers du val de Tours.

Pour réaliser l'analyse de la stabilité à l'aide du logiciel TALREN (©Terrasol), le modèle tel que présenté Figure 2 a été numérisé pour les trois profils de digue et le calcul de stabilité mené selon les recommandations du CFBR. Le calcul nécessite au minimum 3 paramètres de sol : masse volumique humide, cohésion et angle de frottement, récapitulés sur la Figure 3.

Tableau 3. Cotes des crues utilisées pour la modélisation des digues de La-Ville-aux-Dames (DREAL Centre-Val de Loire, 2012)

Situation	Profil 1 (P89)	Profil 2 (P100)	Profil 3 (P116)
Cote de la crête de digue côté Loire (m)	55,60	55,42	55,16
Cote de Loire à l'étiage (m)	44,60	44,75	44,90
Q70 (situation rare de crue) (m)	52,18	51,97	51,63
Q200 (situation exceptionnelle de crue) (m)	53,18	52,99	52,67
Q500 (situation extrême de crue) (m)	53,58	53,40	53,09
Hauteur moyenne de la digue (m)	5,40	6,00	5,40
Largeur de la base de la digue (m)	~ 50	~ 60	~ 65

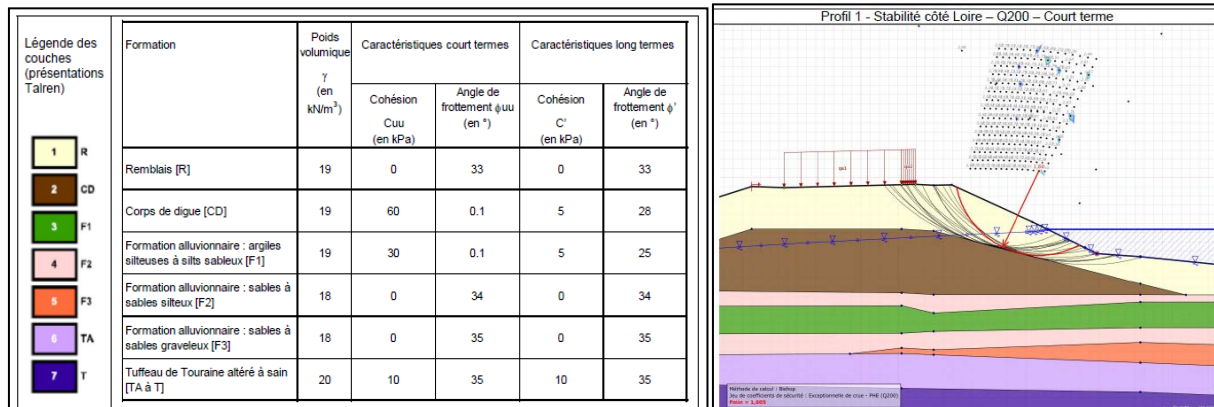


Figure 3. Synthèse des valeurs caractéristiques prises pour la modélisation TALREN. Exemple de calcul pour la crue Q200 sur le profil 1 (Fugro, 2014)

Les calculs réalisés montrent que les trois profils étudiés présentent des facteurs de sécurité supérieurs à 1 et donc des conditions de stabilité globalement respectées pour chacune des situations : à la crue et à la décrue, sur le talus côté val et côté Loire. Les situations en décrue rapide sont cependant toujours les plus défavorables avec au moins un coefficient voisin de 1,1 pour le profil 1.

Ce tronçon de digue n'a a priori pas fait l'objet de renforcement par le passé. La stabilité mécanique étant assurée d'après calcul, c'est la protection contre le risque d'érosion interne qui a fait l'objet de programmation de travaux avec la réalisation de tranchées de sol mixé en 2015-2016.

3. Analyses complémentaires des données de sol

Les matériaux prélevés à la tarière mécanique par Fugro entre 0 et 6 m de profondeur et conservés en sacs étanches, ont été homogénéisés par le Cerema de Blois et l'Ifsttar pour former un seul échantillon de sol d'environ 800 kg qui a servi pour les essais. Les résultats d'identification de l'échantillon moyen sont récapitulés dans le Tableau 1. Il s'agit d'un limon sableux brun classé B5.

3.1. Analyse des teneurs en eau naturelles

Les matériaux utilisés dans les ouvrages en terre neufs font normalement l'objet d'une étude de compactage pour définir le couple teneur en eau et masse volumique optimum pour la mise en œuvre. L'essai n'est par contre pas utilisé pour les étapes de diagnostic géotechnique. On montrera ci-dessous qu'il présente néanmoins un intérêt pour analyser les états hydriques du sol constitutif de l'ouvrage.

L'essai Proctor normal sert à définir les états hydriques qui correspondent à des intervalles de teneurs en eau utiles pour les opérations de compactage (NF P11-300). Dans ces intervalles de teneurs en eau, le comportement du matériau est globalement le même. La norme NF P11-300 définit cinq classes d'états hydriques (très sec "ts", sec "s", moyen "m", humide "h", très humide "th") et les valeurs seuils de teneur en eau pour chaque classe sont données entre autres sur la base de la teneur en eau de l'optimum.

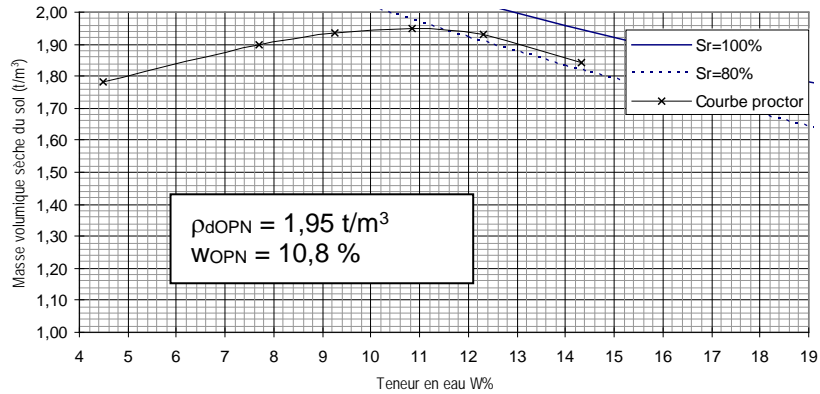


Figure 4. Courbe Proctor normal réalisée sur l'échantillon moyen de la levée de TLA

La référence Proctor du limon sableux B5 est présentée sur la Figure 4. Les teneurs en eau naturelles mesurées sur les échantillons carottés ou prélevés à la tarière ont ensuite été comparés à la référence Proctor et aux valeurs seuils ce qui a permis d'établir le Tableau 3 et la Figure 5.

Tableau 3. Classes d'état hydrique du sol B5 composant la digue de La Ville-aux-Dames

Etats hydriques	ts		s		m		h		th
Teneurs en eau (%)		6		10		12		14	
Nombre d'échantillons	17		13		8		6		5
% d'échantillons	34,7		26,5		16,3		12,2		10,2

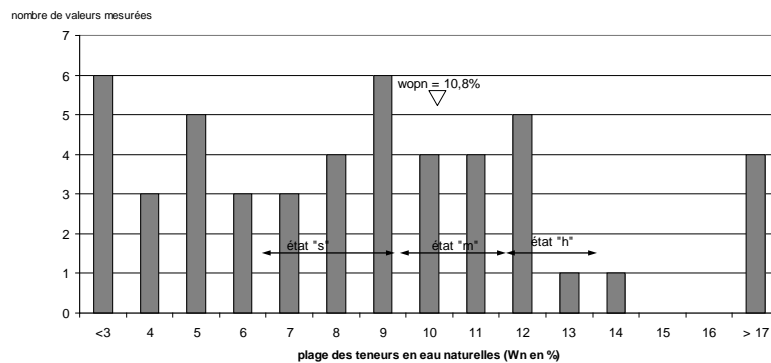


Figure 5. Histogramme des teneurs en eau des sols qui composent la digue de TLA et position par rapport aux classes d'états hydriques évaluées à partir de W_{OPN}

On s'aperçoit à la lecture de ces résultats que les teneurs en eau naturelles, pour des prélèvements effectués en août 2014, sont situées côté sec de la courbe Proctor pour presque 60% des échantillons, avec des valeurs anormalement basses, inférieures à 3%. Les échantillons ayant les valeurs les plus faibles sont essentiellement localisés entre 0 et 3 m de profondeur sur la partie haute de la digue. Plus on s'enfonce dans le cœur de l'ouvrage, plus les teneurs en eau sont élevées.

3.2. Analyse des pénétrogrammes statiques et des densités relatives des sols constitutifs de la levée

Les analyses des profils/sondages au pénétromètre statique permettent de reporter les valeurs de résistance de pointe et de frottement latéral dans les abaques de Robertson, ce qui apporte une information sur la nature des sols.

On peut également exploiter ces valeurs pour évaluer la densité relative des sols en place en utilisant l'indice D_r , ou indice de densité I_D (Plumelle et al., 2013) qui compare la compacité d'un sol grenu par rapport à des variations extrêmes autorisées par la distribution théorique des particules, par définition égale à (1) :

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

avec :

e : indice des vides du sol en place

e_{\min} : indice des vides dans l'état le plus dense (une valeur théorique d' $e_{\min} = 0,35$)

e_{\max} : indice des vides dans l'état le plus lâche (une valeur théorique d' $e_{\max} = 0,92$)

I_D est exprimé en pourcentage.

La connaissance précise de l'indice des vides en place des sols peu cohésifs, étant compliquée on se reporte souvent sur l'utilisation de relations indirectes pour évaluer leur état de densité. Ainsi, le pénétromètre statique peut permettre d'extrapoler la valeur de résistance de pointe q_c à une évaluation de la densité relative du sol en place.

L'abaque de Baldi (Baldi et al., 1986) a été utilisé pour évaluer l' I_D des sols en place, avec l'expression (2) validée sur sable normalement consolidé et un rapport K_0 de 0,45 :

$$I_D = \frac{1}{C_2} \ln \left[\frac{q_c}{C_0 \sigma'_v C_1} \right] \quad (2)$$

avec :

- C_0, C_1, C_2 : coefficients variables selon les sols, ici : $C_0 = 157 - C_1 = 0,55 - C_2 = 2,41$

- σ'_v : la valeur de la contrainte verticale effective dans le sol

- q_c : la résistance de pointe

La calibration des coefficients sur le sable de Ticino a donné les valeurs de C suivantes : $C_0 = 157 - C_1 = 0,55 - C_2 = 2,41$. Ne disposant pas d'étude comparable pour les sables de la digue de La Ville-aux-Dames, ces valeurs ont été utilisées pour les calculs qui suivent. La masse volumique humide des sols a été prise égale à $1,90 \text{ t/m}^3$ qui est aussi la valeur prise pour le calcul de stabilité mécanique ; la gravité $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ pour calculer la contrainte effective σ'_v . Dans les sols avec nappe, la résistance de pointe totale q_t est égale à la résistance de pointe q_c à laquelle s'ajoute l'effet de la pression interstitielle. Dans le cas des sols secs, $q_t = q_c$. Cette approximation a été utilisée dans le cas des sols constitutifs de la digue, car bien que légèrement humides, ils ne sont pas le siège d'une nappe.

Ce sont les pénétrogrammes CPT3013, 3016 et 3021 réalisés respectivement à proximité des sondages carottés SC3, 4 et 5 (Figure 6) qui ont été analysés. La zone du SC3, avec une masse volumique sèche de $1,91 \text{ t/m}^3$, correspond à des résistances de pointe de l'ordre de 4 MPa. Les zones des sondages SC4 et 5 ayant une masse volumique sèche plus faible, $1,47$ et $1,40 \text{ t/m}^3$, ont des résistances de pointe de l'ordre de 2 à 3 MPa. Les variations de résistance de pointe correspondent assez bien aux masse volumique mesurées et donc vraisemblablement à des variations de densité relative.

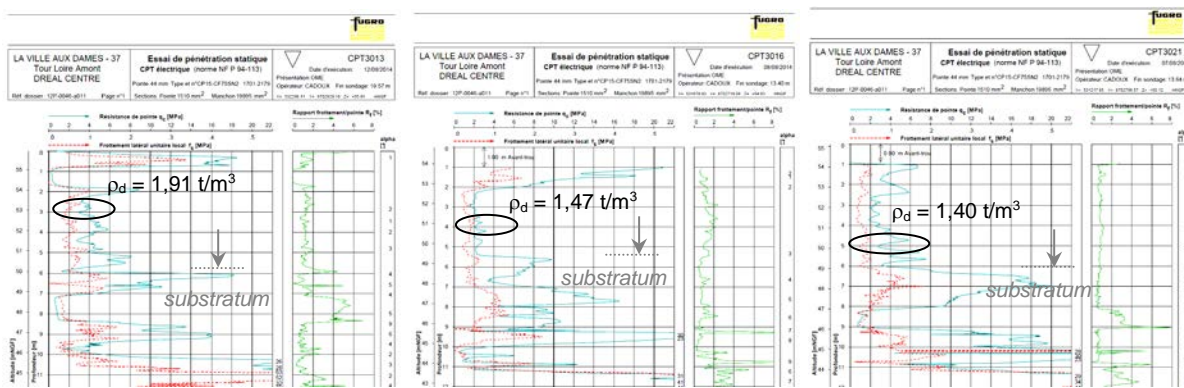


Figure 6. Profils pénétrométriques des sondages CPT3013, 3016 et 3021. Les cercles pointent les échantillons intacts prélevés sur sondages carottés pour la mesure de la masse volumique apparente.

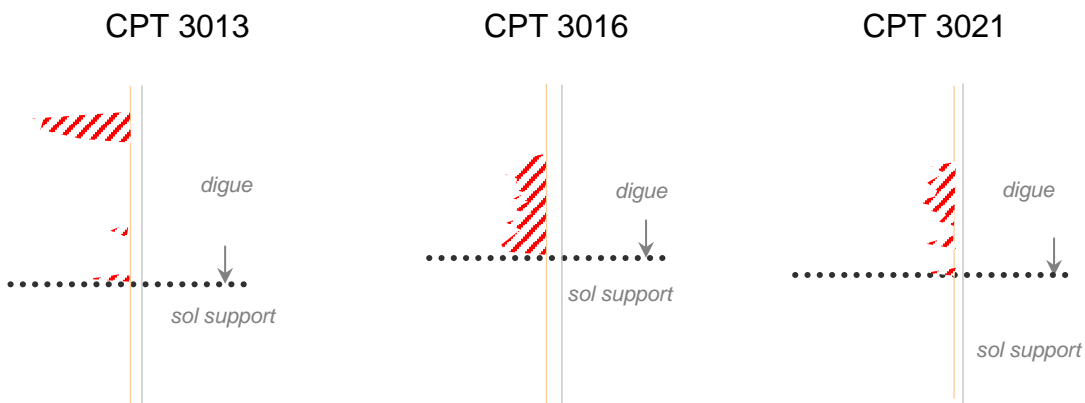


Figure 7. Interprétation des résistances de pointe des sondages CPT3013, 3016 et 3021 exprimées en densité relative en fonction de la profondeur selon Baldi. En hachuré rouge, les zones d'indice de densité inférieur à 40%.

La Figure 7 illustre le résultat des calculs réalisés sur les trois pénétrogrammes. Les anomalies de valeurs (valeurs d' I_D négatives ou supérieures à 100%) par rapport à la masse volumique utilisée dans les calculs de stabilité mécanique, montrent la limite de l'exercice, mais gardent néanmoins une signification par rapport à l'allure générale de la courbe.

Il est d'usage de considérer que les sols avec des indices de densité inférieurs à 40% sont dans des états lâches à très lâches (Plumelle et al., 2013). Ainsi rapporté à la hauteur de la digue auscultée, le pourcentage de sol dans ces états de densité sur les trois sondages sont :

- CPT3013 : **35%** de zones de compacité lâche à très lâche
- CPT3016 : **70%** de zone de compacité lâche à très lâche
- CPT3021 : **55%** de zone de compacité lâche à très lâche

Les anomalies de densité représentées en hachuré rouge, sont réparties aléatoirement sur la hauteur de la digue. Dans le cas du CPT3013, l'anomalie se situe à la fois à la base de la digue et au sommet de la digue. Sur le CPT3016, c'est toute la base de l'ouvrage en terre qui présente une masse volumique probablement plus faible que la masse volumique prise en référence. Dans le CPT3021, les indices de densité ne sont pas aussi faibles que dans les autres sondages et sont globalement situés au milieu et en partie basse de la digue.

4. Synthèse des anomalies géotechniques et mise en perspective

La variabilité des matériaux qui composent la digue Tours Loire Amont est plus importante que celle décrite par une approche traditionnelle combinant les interprétations géophysiques et les corrélations entre sondages sur deux points :

- L'état de densité montre ainsi des variabilités spatiales en lien avec des anomalies de masse volumique. Ces variations peuvent avoir un impact fort sur le calcul de stabilité.
- L'analyse des teneurs en eau montre que les sols qui constituent la digue subissent les effets de la météorologie dans la partie de surface de l'ouvrage sur environ 3 m d'épaisseur. Cet état de sécheresse tend à s'estomper en profondeur, vers le cœur de l'ouvrage. Les anomalies de densité peuvent d'ailleurs être un résultat des cycles d'humidification-séchage et des variations d'état hydrique.

Les travaux à venir doivent donc mettre en relation les variations de ces états hydriques avec des calculs de stabilité menés non plus à la saturation mais dans des états non saturés, variant spatialement (au sein de l'ouvrage) sur les teneurs en eau mais également sur les masses volumiques, et temporellement selon les cycles météorologiques (d'humidification-séchage) ou les cycles d'inondation.

5. Références bibliographiques

- AFNOR (1992). NF P11-300. Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- AFNOR (1995).NF P94-050. Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Méthode par étuvage.
- AFNOR (1993).NF P94-051. Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- AFNOR (1995).NF P94-052-1. Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Partie 1 : Limite de liquidité – Méthode du cône de pénétration.
- AFNOR (1991).NF P94-053. Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.
- AFNOR (1991).NF P94-054. Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des particules solides des sols – Méthode du pycnomètre à eau.
- AFNOR (1996). NF P94-056. Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique – Méthode par tamisage à sec après lavage.
- AFNOR (1992).NF P94-057. Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation.
- AFNOR (1998).NF P94-068. Sols : Reconnaissance et Essais – Mesure de la quantité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache.
- Baldi G., Bellotti V.N., Ghionna N., Jamiolkowski M. & Pasqualini E. (1986). Interpretation of CPT's and CPTU's – 2nd part: drained penetration of sands. 4th International Geotechnical Seminar Field Instrumentation and In Situ Measurements, Nanyang Technological Institute, Singapore, 25-27 Nov. 1986. pp.143-156.
- CFBR (2015). Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai. Editions du Comité Français des Barrages et Réservoirs. 132 pages. http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2015_remb lai.pdf
- Direction Régionale de l'Environnement du Centre (1996). La Loire, histoire des protections contre les crues. Document DRE Centre, Orléans. 24 pages.
- Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement Centre-Val de Loire (2012). Etude de danger du Val de Tours.
- Fugro (2014). Projet de confortement de digue – Saint-Pierre-des-Corps – La-Ville-aux-Dames (37). Etude géotechnique préalable (G1 Diagnostic géotechnique (G5). Bons de commande Géo-016 et 023 dans le cadre du marché 2011 1700145108. Dossier n°12P-0046-a12 / 12P-0046-a19. Version B. 421 pages.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (2015). Référentiel technique digues maritimes et fluviales. Version 1 de janvier 2015. 191 pages. https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/referentiel_technique_digues_maritimes_et_fluviales.pdf
- Plumelle C., Cui Y.-J., Fabre D., Fouche O., Hirshauer A., Tabbagh A. (2013). Théorie et pratique de la géotechnique. Editions Le Moniteur. 999 pages.