

ARTICLE D'INGÉNIERIE / ENGINEERING ARTICLE

L'utilisation de sols résiduels tropicaux dans la construction du barrage de Moreau (Guadeloupe)

Patrick Soulat^{1,*}, Stephen Bonnet², Mathieu Le Floch², Bernard Tardieu³, Daniel Billaux⁴, Claudio Carvajal⁵, Géraldine Rougier¹ et Alain Pecker⁶

¹ Suez Consulting – Le Bruyère 2000, Bâtiment 1, région Occitanie, zone du Millénaire 650, rue Henri Becquerel, 34961 Montpellier, France

² Suez Consulting – Centre d'Affaires de Colin ZAC de Colin, département de la Guadeloupe, 97170 Petit-Bourg, France

³ Commission Énergie et Changement Climatique, Académie des Technologies, Paris, France

⁴ ITASCA Consultants, région Rhône-Alpes, S.A.S. 64, Chemin des Mouilles, 69134 Ecully, France

⁵ INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, 3275 Route Cézanne, 13182 Aix en Provence, France

⁶ École des Ponts ParisTech, Paris, France

Résumé – Le barrage de Moreau est un barrage en remblai actuellement en construction sur la commune de Goyave en Guadeloupe. Le barrage est fondé sur des roches résiduelles d'origine volcanique. Ces roches se sont formées sur place par altération *in situ*, c'est-à-dire sans transport. Cette altération, qui pénètre profondément dans la roche, est accélérée par la pluie et la température. L'altération produit des matériaux argileux en passant, à des stades d'altération intermédiaires, par des matériaux aux caractéristiques et aux comportements inhabituels, en particulier l'allophane, l'halloysite et la kaolinite. Dans le cas du barrage de Moreau, les matériaux résiduels sont proches de l'halloysite. Sensibles à l'eau, ils ont aussi été utilisés pour les remblais du corps du barrage. L'article traite du comportement peu courant de ces matériaux, de leurs caractéristiques géotechniques, et des particularités de leur mise en œuvre en remblai sur le barrage de Moreau.

Mots clés : barrage en remblai / sols résiduels tropicaux / argile / teneur en eau / compactage

Abstract – **Using tropical residual soils in dam construction – The example of Moreau dam, Guadeloupe.** The Moreau dam is an embankment dam currently under construction in the commune of Goyave in Guadeloupe. The dam foundation is composed of residual rocks of volcanic origin. These rocks were formed on site by weathering *in situ*, *i.e.* without transport. This weathering, which penetrates deep into the rock, is accelerated by rain and temperature. Weathering produces clayey materials by passing, at intermediate weathering stages, through materials with unusual characteristics and behaviors, in particular allophane, halloysite and kaolinite. In the case of the Moreau dam, the residual materials are close to halloysite. Sensitive to water, they were also used for the embankments constituting the dam body. The article discusses the unusual behavior of these materials, their geotechnical characteristics, and the particularities of their use as embankment on the Moreau dam.

Keywords: embankment dam / tropical residuals soils / clay / water content / compaction

1 Introduction

Le barrage de Moreau est un barrage en remblai actuellement en construction sur la commune de Goyave en Guadeloupe.

Dans le contexte sensible de la ressource en eau aujourd'hui en Guadeloupe, cet ouvrage représente un enjeu majeur et un ouvrage stratégique afin de combler les besoins en eaux brutes de la filière agricole. En effet, il servira à alimenter

en eau la Basse-Terre pendant la période sèche pour l'irrigation de la Côte-au-Vent (côte est) et pour l'alimentation en eau brute de la Grande-Terre.

La Maîtrise d'ouvrage de l'opération est confiée au Conseil Régional de Guadeloupe, la Maîtrise d'œuvre à Suez-Consulting. L'ouvrage sera rétrocédé au département en vue de son exploitation lorsqu'il aura été achevé.

Les travaux ont débuté en 2014 (travaux préparatoires) et la mise en eau du barrage est prévue pour fin 2019.

Le barrage est implanté sur la ravine Zombi, affluent de la rivière Moreau, et sera alimenté principalement en gravitaire

* Auteur de correspondance : patrick.soulat@suez.com

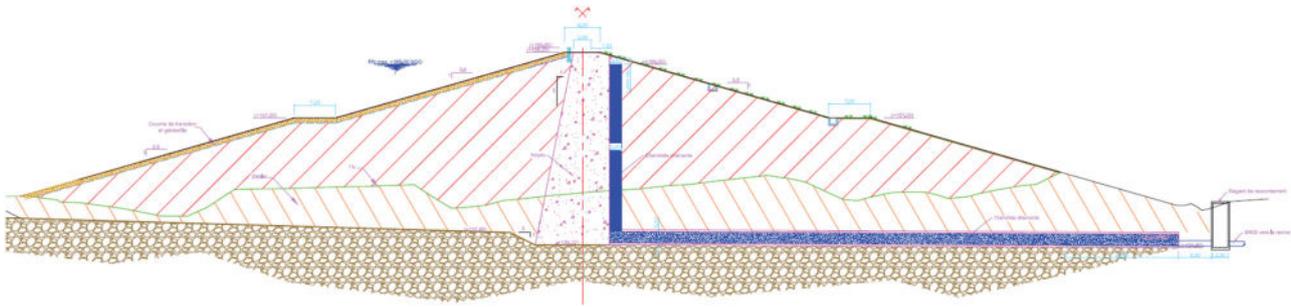


Fig. 1. Coupe type au droit de la cheminée drainante.
Fig. 1. Cross-section of Moreau embankment dam crossing drainage trench.

par une prise située sur cette rivière, et très faiblement par les apports du bassin versant et de la ravine elle-même.

Ce barrage en remblai est réalisé avec les matériaux empruntés sur le site. Ces matériaux argileux d'origine volcanique présentent des caractéristiques inhabituelles (densité sèche faible, forte teneur en eau naturelle, teneur en eau OPN élevée), dans un contexte de sismicité forte (zone 5 selon zonage français).

2 Caractéristiques du barrage de Moreau

Le barrage de Moreau est un ouvrage d'une hauteur de 27 m qui permet le stockage de 900 000 m³ d'eau. Sa longueur en crête est de 255 m. Il s'agit d'un barrage en remblai pseudo-homogène. Une cheminée centrale drainante est connectée en aval à un tapis drainant au contact fondation/remblais sur toute la largeur du corps du barrage, lui-même raccordé à une tranchée drainante. Les ouvrages annexes sont constitués d'un évacuateur de crue latéral, d'un ouvrage amont de prise d'eau, d'une galerie sous remblai en béton armé d'une longueur de 200 m abritant une conduite d'adduction/distribution et une canalisation de vidange, et d'un aménagement aval de restitution à la rivière (Fig. 1).

L'ensemble des caractéristiques de l'ouvrage sont présentées dans le [tableau 1](#).

3 Contexte géologique

Six grands ensembles volcaniques ont été reconnus sur la Basse-Terre : le complexe de base au nord de l'île, la Chaîne septentrionale au nord-ouest, la Chaîne Axiale le long de l'axe tectonique majeur de l'île (NNO-SSE), les Monts Caraïbes à l'extrémité méridionale, le massif de Bouillante à l'Ouest et le massif de la Soufrière au sud de l'île.

La connaissance de la géométrie des formations volcaniques de la Chaîne Axiale est encore sommaire. Malgré la datation des coulées et des projections, il n'existe pas, sur le versant oriental de la chaîne, de téphrochronologie. La carte géologique de référence reste celle de [de Reynal de Saint-Michel et al. \(1966\)](#) (échelle 1/50 000). La ravine Zombi, au sein de laquelle le projet de barrage s'inscrit, apparaît comme étant constituée par les conglomérats continentaux anté-miocène (avant 5 Ma). Plusieurs datations postérieures à la carte géologique ont infirmé cet âge et [Samper \(2007\)](#) a proposé une mise en place des matériaux volcaniques entre 616 et 659 ka.

Il y a un réel intérêt scientifique à mieux connaître ces roches résiduelles d'origine volcanique en milieu tropical qui constituent la fondation du barrage de Moreau et son matériau constitutif. Ces roches résiduelles sont formées sur place par altération *in situ*, c'est-à-dire sans transport.

Il semblerait que le niveau d'altération correspond à des époques miocène, alors que la présence d'halloysite est signalée par la carte pédologique au 1/20 000 dessinée par Colmat Daage en 1969/1970. Notons que la carte géologique au 1/50 000 par Alain de Reynal situe le site du barrage dans le Pliocène ou plutôt dans le complexe volcanique anté-miocène, mais la présence d'halloysite signalée par les pédologues suggère un âge plus récent que l'anté-miocène.

L'altération de la roche est accélérée par la pluie et la température. Cette altération pénètre profondément dans la roche, de plusieurs dizaines de mètres. Elle produit des matériaux argileux en passant, à des stades d'altération intermédiaires, par des matériaux aux caractéristiques et aux comportements inhabituels, en particulier l'allophe, après plusieurs siècles, l'halloysite après 40 à 80 siècles et la kaolinite après quelques centaines de milliers d'années.

Les premières reconnaissances sur le site de Moreau faites par le BRGM en 1991 ont conduit à l'identification de plusieurs formations géologiques (de haut en bas) :

- des argiles brunes à quartz ;
- des brèches pyroclastiques métriques à décamétriques ;
- des « conglomérats continentaux » décrits dès 1966 ;
- un substratum altéré type andésite en base de séquence.

Suite à la réalisation de sondages carottés en 1997 (Stucky) et 2005 (GEOMAT Antilles), et grâce à une meilleure connaissance des matériaux volcaniques de la Basse-Terre, les descriptions et appellations des différentes formations reconnues ont évolué.

Ceci a conduit à la nécessité d'harmoniser les terminologies afin d'appréhender au mieux la géologie du site.

L'observation *in situ* des affleurements lors des premiers travaux de terrassements en octobre 2015 et l'analyse conjointe de la bibliographie existante ont permis de dresser les grandes lignes géomorphologiques du site du barrage de Moreau :

les formations volcaniques sont de deux natures : une ou plusieurs coulées d'andésite très localisées et des lapillis en séquences métriques à inframétriques ; ces formations sont très altérées mais gardent leur structure primaire reconnaissable

Tableau 1. Caractéristiques du barrage.**Table 1.** Dam features.

Données générales	
Dénomination de l'ouvrage	Barrage de Moreau
Maître d'ouvrage	Conseil Régional de la Guadeloupe
Commune	Goyave
Cours d'eau	Ravine Zombi
Source d'alimentation principale	Prise d'eau rivière Moreau
Destination principale de l'ouvrage	Réserve eau agricole
Date de construction	Travaux en cours (fin prévue 2019)
Classement (décret 2015-526 du 12 mai 2015)	B
Caractéristiques principales de l'ouvrage	
Type de barrage	Barrage remblai homogène
Terrain de fondation	Dépôts volcaniques anciens argilisés
Hauteur max au-dessus du terrain naturel sur l'axe	27,00 m
Longueur en crête	255 m
Largeur en crête	6,0 m
Fruits du parement amont	3,5/1 avec risberme à 157 m NGG
Fruits du parement aval	3,5/1 avec risberme à 157 m NGG
Altitude de la crête du barrage	168,00 m NGG / muret 168,80 m NGG
Altitude de la crête du déversoir	166,00 m NGG
Altitude de la retenue maximale en exploitation normale	166,00 m NGG
Altitude de la retenue maximale exceptionnelle	167,00 m NGG
Aire de la retenue au niveau normal	9,80 ha
Capacité de la retenue	990 000 m ³
Dispositif d'auscultation	
Repères de nivellement	15 plots de contrôle topographique
Piézométrie	62 cellules
Mesure des débits de fuites	Tranchée drainante et conduite drainage DN400 avec débitmètre
Suivi de fissure de la galerie	Vinchons
Mesure du niveau du plan d'eau	Capteur de niveau + échelle limnimétrique
Ouvrages d'évacuation des crues	
Type	Seuil libre Creager (166,0 m NGG)
Emplacement	Rive droite
Débit maximal (m ³ /s)	52 m ³ /s
Ouvrage de prise d'eau	
Type	Conduite DN 600 (crépine de fond)
Débit nominal (m ³ /s)	0,5 m ³ /s
Ouvrage de vidange	
Type	Vanne annulaire DN 500
Débit maximal de la vidange à PHE (m ³ /s)	1,5 m ³ /s
Hydrologie	
Crue de projet (débit entrant déca-millénaire)	Q = 92 m ³ /s
Bassin versant	1,1 km ²

par des tephres et des minéraux (plagioclases intra-andésitique);

des formations alluviales récentes très variées passant de faciès de haute énergie (blocs et éboulis) à des formations stagnantes (tourbe et gley);

des formations superficielles constituées d'argile rouge à quartz et de sols limoneux type andosol.

Les lapillis constituent le substratum du barrage de Moreau. Cette désignation englobe les formations décrites antérieurement suivantes: les «conglomérats» décrits en 1966, les «brèches et micro-brèches» décrites par le BRGM (1991b) et les «argiles à fragment de roches friables» décrites par GEOMAT (2005).

4 Adaptations de la conception du barrage

Les études de conception du barrage ont fait l'objet de demandes d'éléments complémentaires de la part de différents organismes de contrôle. Une partie de ces demandes portait sur des compléments relatifs à la mise en œuvre des matériaux et à la modélisation du comportement du barrage sous sollicitation sismique.

Suite à ces demandes, une modélisation numérique a été réalisée avec le logiciel FLAC pour l'analyse du comportement du barrage (statique et dynamique), et un panel d'experts a été mobilisé pour valider les hypothèses et l'analyse des résultats du modèle.

En janvier 2016, les résultats du modèle (ITASCA, 2016) ont montré des déplacements incompatibles avec la stabilité de l'ouvrage (déplacements irréversibles dans la fondation sous séisme). Après une nouvelle expertise, et au vu du décalage entre les caractéristiques géotechniques des matériaux retenues et l'examen visuel des matériaux sur site, il a été décidé de réaliser des investigations complémentaires pour approfondir la connaissance de la fondation.

Un plan d'action mêlant études géotechniques et géophysiques complémentaires et adaptations techniques a donc été élaboré. Ces études complémentaires ont permis une meilleure compréhension rhéologique des matériaux et le recalage du niveau de fondation de l'ouvrage.

Les études géotechniques (excavation de tranchées) ont montré que sous les alluvions superficielles identifiées en fond de vallée, se trouve une épaisseur de quelques mètres de roche volcanique très altérée (lapillis) et saturée en eau, du fait de la présence de la nappe phréatique en fond de vallée. Les rives sont naturellement drainées. Ces sols volcaniques résiduels sont formés de roche en place altérée en fonction de la distance à la surface et de la présence éventuelle de petites failles. Il peut exister des variations latérales notables en fonction des dépôts successifs de matériaux volcaniques, en particulier d'une tranchée à l'autre.

Sous cette couche de roche très altérée, la roche tendre compacte apparaît. Sous l'action de la pelle, elle se débite en blocs certes tendres, mais constitués d'un matériau qui présente une cohésion notable. Des arrivées d'eau apparaissent au contact des deux matériaux. Le fond de la tranchée se remplit d'eau, preuve qu'il existe des circulations d'eau non négligeables dans cette roche. Le niveau de fondation a été redéfini comme étant celui où la pelle pénètre difficilement ou pas du tout, ou le godet grince et le rocher se brise en blocs.

D'un point de vue géologique, la structure de la roche est composée de plis, de joints, de veines qui augmentent localement la perméabilité généralement faible. La macrostructure contrôle la perméabilité et les structures relictuelles sont les chemins privilégiés des écoulements.

Pour cette raison, les adaptations techniques ont consisté notamment à prévoir un filtre drain de contact sous la recharge aval. En effet, des écoulements d'eau en provenance de la retenue peuvent se produire malgré une perméabilité généralement très faible. S'ils n'étaient pas collectés par le drain de contact, ces écoulements pourraient augmenter les sous-pressions dans la recharge aval et dans la rive à l'aval et menacer la stabilité.

Les observations de terrain sur les tranchées à la pelle ont été complétées par une analyse du comportement de la roche de fondation après prélèvements *in situ* et essais en laboratoire. Des mesures de vitesse sismiques ont également été effectuées, qui ont confirmé une limite assez nette entre la roche très altérée et le substratum altéré apte à assier le barrage. Ces résultats ont conduit à prévoir une purge des matériaux de fond de vallée (lapillis très altérés) sur une épaisseur allant jusqu'à 6 m.

Le modèle numérique a été mis à jour afin de prendre en considération une optimisation des caractéristiques des matériaux et la nouvelle géométrie du barrage issue des adaptations techniques (Fig. 2). Les résultats ont permis de vérifier que les déplacements obtenus étaient admissibles pour la stabilité du barrage au séisme.

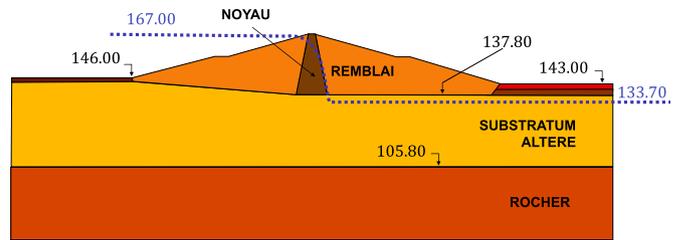


Fig. 2. Coupe modélisée.

Fig. 2. Modeled cross-section.

5 Particularités de la modélisation

Le modèle de comportement adopté est un modèle de plasticité développé pour les études sismiques des matériaux pulvérulents ; ce modèle dénommé PM4SAND est implémenté dans le code *FLAC* utilisé pour les études. Il comporte une surface de plasticité contrôlée par un rapport de contrainte, compatible avec la notion d'état critique ; en outre, il permet la modélisation des phénomènes de dilatance-contractance essentiels pour les matériaux considérés sous des sollicitations sismiques.

Le calage des paramètres de comportement a été réalisé pour une sollicitation en situation non drainée (les courbes contrainte/déformation mettent en évidence la dilatance au-delà d'un certain seuil de contraintes) ; il permet de représenter de façon satisfaisante le comportement en cisaillement des matériaux et le comportement volumétrique (variations de pression interstitielle).

Le modèle et ses paramètres ont été jugés aptes à rendre compte du comportement sismique des matériaux constituant la fondation et le corps du barrage de Moreau. Cette modélisation a permis notamment de tenir compte de l'évolution des pressions interstitielles.

Les résultats d'essais triaxiaux cycliques ont été retenus pour caler le modèle de la fondation en fond de vallée. Les matériaux ont été testés pour des confinements de 300 et 400 kPa. La figure 3 montre un exemple de résultats : les essais cycliques sur les lapillis au confinement de 300 kPa, pour des déviateurs 240 et 380 kPa.

Un déviateur de 240 kPa produit des déformations réversibles. L'irréversibilité devient très marquée lorsque le déviateur atteint 380 kPa, chaque cycle produisant de l'ordre de 1 % de déformation verticale supplémentaire (déformation de $\pm 0,7\%$ au départ, puis comportement irréversible).

Le comportement au séisme est vérifié au SES (Séisme d'Evaluation de la Sécurité), avec une accélération maximale au rocher égale à 0,5 g. Une évaluation de l'aléa sismique et une campagne de mesures géophysiques de bruit de fond ont été réalisées sur site en novembre 2012.

Le déplacement horizontal élastique obtenu au contact entre remblai et fondation est de 8 cm.

6 Généralités sur les argiles résiduelles dans les Antilles

Atlan et Feller (1984) ont étudié les propriétés physiques et géotechniques des argiles dans les Antilles françaises et ont synthétisé leurs résultats selon les types d'argiles dans le

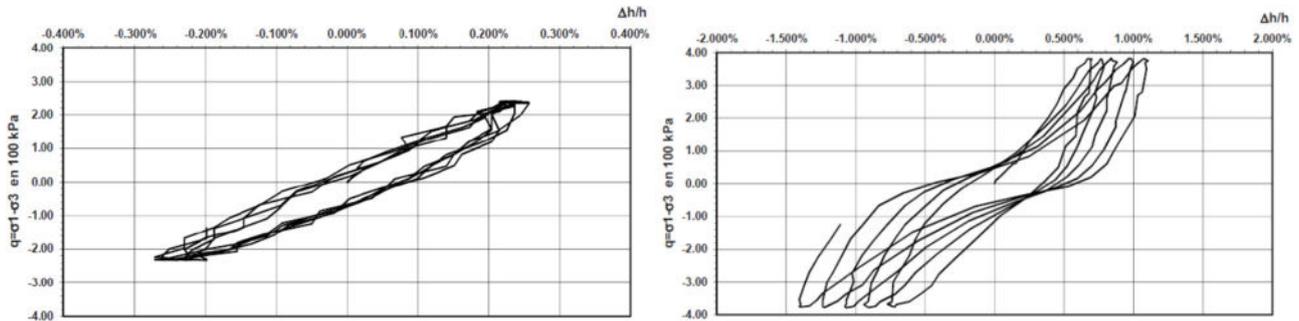


Fig. 3. Essais cycliques – Confinement 300 kPa – Diagramme déviateur / déformation verticale – Déviateurs 240 kPa, 380 kPa.
Fig. 3. Cyclic tests results – Confinement 300 kPa – Diverter diagram / vertical deformation – Diverterers 240 kPa, 380 kPa.

tableau 2. À noter que l’abaque de Casagrande ayant été obtenu à partir de deux études antérieures (Casagrande, 1948 ; Mitchell, 1976) ne se basant pas uniquement sur des argiles des Antilles françaises, les domaines de plasticité des différentes argiles ne correspondent pas exactement à ceux d’Atlan et Feller (1984). En particulier, les halloysites de l’étude de 1984 ont un domaine plus étendu avec des limites de liquidité plus élevées (jusqu’à 98 %).

Il en ressort que la kaolinite et l’halloysite sont de bons matériaux pour la construction d’un barrage. Il s’agit d’argiles peu actives, c’est-à-dire peu sensibles au retrait et gonflement en présence d’eau, et qui sont également moins plastiques que les allophanes, ce qui est favorable. Dans son étude, Zemen (2009) montre que le retrait volumique associé aux sols composés de kaolinites est limité à 3 % quand celui de sols composés de montmorillonites peut aller jusqu’à 75 %.

La plasticité de ces argiles est modérée par rapport à celle que l’on peut avoir pour l’allophane ou la montmorillonite et Terzaghi (1958) et Atlan et Feller (1984) mettent en avant leur résistance au cisaillement. Ainsi, ils font référence à Dixon *et al.* (1970) qui mentionnent des talus verticaux de 10 m taillés dans des sols à halloysite du Kenya. Ce type de matériaux a déjà été utilisé pour la construction du barrage de Sasuma (Kenya) avec des caractéristiques Proctor similaires (Wopn entre 45 et 55 % et γ_{opn} de 1,0 à 1,2 t/m³). Des tassements de 5 m avaient été calculés à partir des valeurs pour un sol ordinaire, finalement les tassements furent insignifiants et le barrage se comporte parfaitement.

À ce propos, il est à noter que les tranchées et les puits qui ont été creusés sur le site du barrage de Moreau, pour faire des prélèvements, sont restés en place après des mois passés sous le soleil et la pluie.

La kaolinite et l’halloysite sont des argiles relativement ordinaires qui proviennent, dans la plupart des cas, de l’altération hydrothermale de dépôts volcaniques. C’est pourquoi, ce sont des matériaux très fréquents dans les pays tropicaux volcaniques dont la Guadeloupe fait partie. Ce sont des silico-aluminates qui ont la même composition chimique. Elles ont pour caractéristiques une surface spécifique très élevée et une densité sèche faible.

D’après Kalenda (2014), la kaolinite est formée d’un empilement alterné de feuillets de silice et d’alumine où chaque paire de feuillets représente une épaisseur d’environ 7 Å. L’empilement de ces feuillets forme des ensembles assez compacts, relativement bien équilibrés électriquement. La kaolinite est un minéral plus stable que l’halloysite car les feuillets sont liés les uns aux autres par des liaisons type

hydrogène, donc des liaisons relativement fortes : il en résulte que l’empilement est difficile à dissocier. Le minéral est, par conséquent, dit stable car l’eau ne peut ni circuler entre les feuillets ni provoquer un gonflement ou retrait des particules. Avec le temps, l’halloysite peut se transformer de manière irréversible en kaolinite par déshydratation. De plus, la résistance au cisaillement de la kaolinite est relativement meilleure que pour d’autres minéraux argileux.

L’allophane est composée d’une importante fraction d’eau structurale qui s’évapore à 105 °C mais pas à 50 °C donc l’écart dans les mesures de teneur en eau devrait être beaucoup plus important. Atlan et Feller (1984) mentionnent un phénomène similaire pour l’halloysite, mais beaucoup moins marqué. Dans le cas du barrage de Moreau, les essais réalisés par Antilles Géotechnique, ont montré qu’il existe une différence de l’ordre de 3 % de teneur en eau, entre l’étuvage à 50 et 105 °C, ce qui est assez faible et qui conduit à considérer que les argiles à quartz et les lapillis se comportent comme un mélange d’halloysite et de kaolinite, et non comme des allophanes.

L’halloysite appartient à la famille des kaolinites dont elle est une forme hydratée dans laquelle chaque paire de feuillets silice/alumine est lié à la suivante par une couche de molécule d’eau. Le module représente une épaisseur de 10 Å pour la forme hydratée. Il existe également une forme anhydre de plus faible épaisseur. Les molécules d’eau seraient situées dans des tubes allongés dont le diamètre varie de 0,04 à 0,19 μm. En effet, les feuillets seraient soumis à des tensions. Cependant, la présence de molécules d’eau entre les feuillets diminue leurs interactions, ce qui les conduit à s’enrouler en « tubes ». Dès que la maille perd 1,5 moles d’eau, les tubes se déroulent. Une partie de l’eau au sein de ces argiles est donc structurale. Les études montrent que la différence entre l’halloysite et la kaolinite correspond à une déshydratation importante à 100 °C de l’halloysite par rapport à la kaolinite.

7 Caractéristiques géotechniques des matériaux du barrage de Moreau

7.1 Les lapillis de la fondation

Les lapillis altérés constituent la fondation du barrage, tandis que la partie très altérée, plus superficielle, a été purgée.

L’indice de plasticité de la formation de lapillis est en moyenne de 20,9, avec une majorité de valeurs inférieures à 22, et la limite de liquidité moyenne est de 72 %, ce qui montre qu’elle est relativement peu plastique.

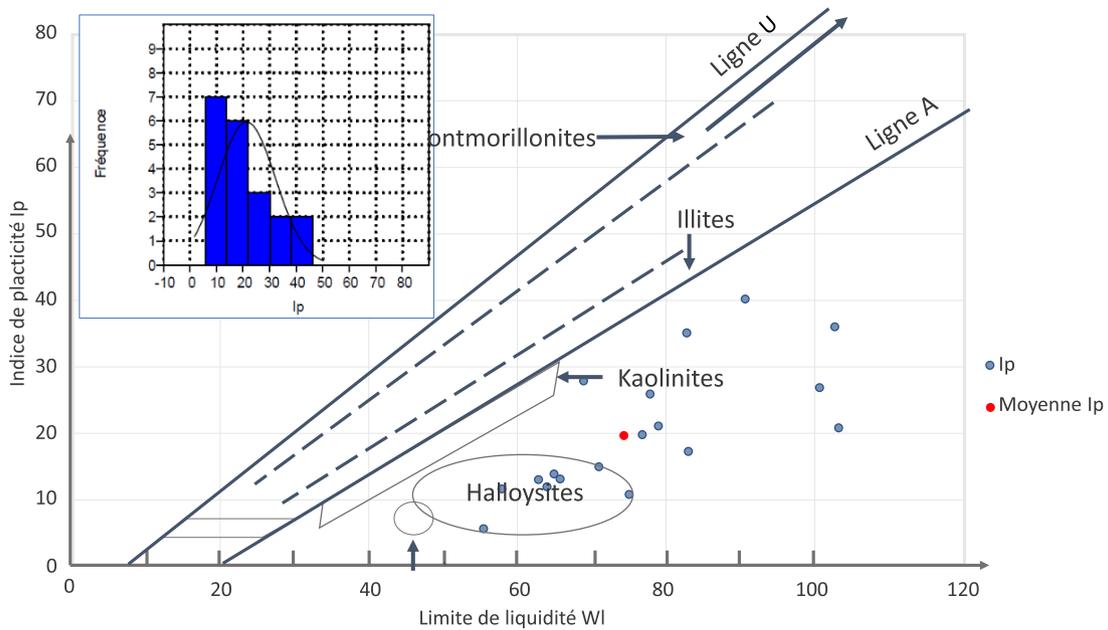


Fig. 4. Diagramme de plasticité (+ histogramme I_p) des lapillis en fondation.
Fig. 4. Plasticity diagram (+ I_p histogram) of lappilis constituting the foundation.

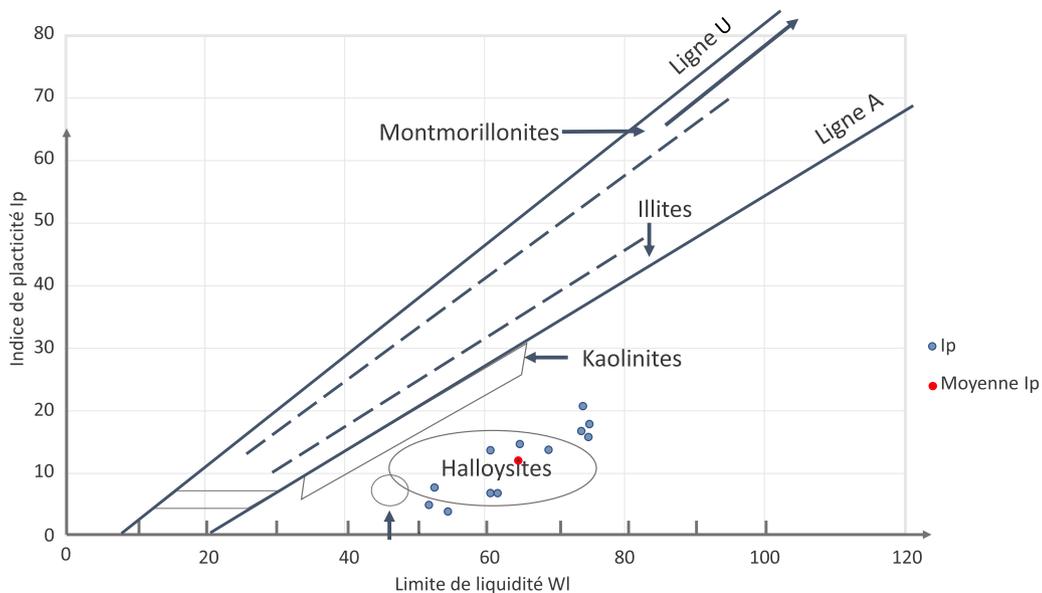


Fig. 5. Diagramme de plasticité des lapillis pour le corps du barrage.
Fig. 5. Plasticity diagram of lappilis constituting the dam body.

Avec l'abaque de plasticité de Casagrande, nous pouvons voir que l'ensemble des valeurs se trouvent sous la droite A, ce qui rapproche les lapillis de la kaolinite et l'halloysite. L'importante altération de cette formation explique son analogie avec des formations argileuses (Fig. 4 et 5).

Aucun des échantillons ne se comporte comme de l'illite ou de la montmorillonite qui sont deux argiles très actives, donc très plastiques avec d'importantes variations de volumes

en présence d'eau (gonflements et retraites importants). La kaolinite et l'halloysite sont en effet des argiles peu actives.

Une analyse minéralogique réalisée en septembre 2015 sur des échantillons d'argile prélevés dans l'emprise du barrage, a permis de confirmer que les argiles du site étaient bien composées majoritairement de kaolinite et d'halloysite. L'absence d'argile de type gonflante a également été confirmée.

Tableau 2. Propriétés physiques et géotechniques des argiles dans les Antilles françaises – Atlan et Feller (1984).
Table 2. *Geotechnical and physical properties of tropical clays from the French West Indies – Atlan et Feller (1984).*

Matériaux	γ_d/m^3	W%	WL%	IP	pF 3,0	Proctor		Caractéristiques mécaniques moyennes		Faciès
						W_{opt}	γ_{opt}	C en bar	ϕ en °	
Andosols (Allophanes)	0,3-0,8	70-225	75-300	10-100	67-192	76,2(1 seul échantillon frais)	0,84	$C' \simeq 0$, $\phi' \simeq 36^\circ$ $C_{un} \simeq 1,3$, $\phi_{un} \simeq 25^\circ$	Aspect limoneux, raide à mou, très humide, glissant, jaune à ocre à léger. Caractéristiques dans les régions à pluie > 2 m/an et sur ponce Test N à F très positif	
Sols à Halloysite (parfois allophanes en petite quantité)	Environ 1,0-1,1	10-70	40-98	15-40	30-50	40,0	1,4	Très variable selon le degré de saturation C_{un} 0,5-1,2, ϕ_{un} 0,0-35	Argile très plastique, consistance moyenne, humide, brun-jaune à brun-rouille, puissance 1 à 3 m Test N à F faible à nul	
Autres altérites (kaolinite, montmorillonite, parfois halloysite en petite quantité)	Environ 1,0-1,2	30-50	68-119	20-40	40-60	29-33	1,3	essai $\left\{ \begin{array}{l} C \simeq 0,5 \\ \phi \simeq 30 \end{array} \right.$ essai $\left\{ \begin{array}{l} C = 0,1 \\ \phi = 28 \end{array} \right.$	Argile plastique, raide, humide, rouge à rouge brun à bartolée en profondeur (transition avec l'horizon C), puissance : plusieurs mètres En martinique : sur roche mère laviée. Parfois recouvert (1 à 10 m) par des cendres péleennes plus ou moins altérées ou des sols à halloysite dominant Test N à F faible à nul	

Tableau 3. Synthèse des caractéristiques des matériaux pour le remblai.

Table 3. *Summary of the embankment materials features*

ZE5	Masse volumique sèche γ_d (t/m^3)	Masse volumique saturée γ_{sat} (t/m^3)	Teneur en eau naturelle W(%)	Limite de liquidité WI (%)	Indice de plasticité I_p	Porosité n	Proctor		Triaxiaux	
							Teneur en eau à l'optimum W_{opt} (%)	Masse sèche à l'optimum γ_{opt} (t/m^3)	Cohésion drainée C' (kPa)	Angle de cisaillement ϕ' (°)
Argiles à quartz	1,07(0,91-1,17)	1,66(1,55-1,73)	54(40-63)	65(52-75)	12(4-21)	0,61(0,46-0,67)	49(40-55)	1,11(1,05-1,17)	40,1(22-66)	30(23-34)
Lapillis	1,09(0,95-1,3)	1,68(1,59-1,81)	51(46-57)	64(57-72)	10(6-15)	0,63(0,44-0,76)	46(41-53)	1,12(1,02-1,30)	-	-

Les masses volumiques humides γ_h (valeurs mesurées ou calculées) des lapillis en fondation sont relativement homogènes, avec γ_h moyen = 1,64 t/m³.

Les masses volumiques saturées γ_{sat} de ces matériaux sont relativement homogènes, hormis pour 3 valeurs basses, avec γ_{sat} moyen = 1,64 t/m³ (en écartant ces 3 valeurs, γ_{sat} moyen = 1,66 t/m³).

La masse volumique sèche moyenne mesurée à l'OPN est de $\gamma_{d,OPN}$ moyen = 1,05 t/m³.

Les matériaux sont donc saturés ou proches de la saturation à l'état naturel.

Les teneurs en eau naturelle des argiles dans l'emprise du barrage sont hétérogènes. Elles varient de 44 à 76 % (soit 34 points entre le matériau argileux le moins humide et le plus humide), avec W_{nat} moyen = 54 %.

La porosité moyenne des lapillis de fondation du barrage est de $n = 0,63$. Les différentes valeurs (mesurées et calculées) sont relativement homogènes.

L'indice des vides moyen des lapillis de fondation du barrage est de $e = 1,73$. Le volume de vides de ce matériau est donc supérieur au volume de solide. Ceci s'explique par la composition et la structure minéralogique des lapillis.

Les valeurs au bleu de méthylène sont compris entre 1,6 et 3,2 et le passant à 80 microns est supérieur à 90 %.

Le perméabilité de la couche de lapillis (mesurée) au niveau du fond de fouille, mesurée par essais Lefranc et Nasberg, est de $k = 5.10^{-8}$ m/s.

Les matériaux argileux sur le barrage de Moreau présentent une cohésion moyenne C' de 40 kPa et un angle de cisaillement ϕ' de 30°.

7.2 Lapillis et argile à quartz de la zone d'emprunt

Il est à noter que les argiles à quartz et les lapillis de la zone d'emprunt ont des caractéristiques semblables.

Comme pour la fondation, les teneurs en eau naturelle des argiles de la zone d'emprunt sont hétérogènes. Elles varient de 40 à 63 % (soit 23 points entre le matériau argileux le moins humide et le plus humide), avec W_{nat} moyen = 54 %.

Les valeurs de masse volumique sèche à l'OPN sont homogènes, (moyenne : 1,11 t/m³), de même que les teneurs en eau à l'OPN (moyenne à 49 %).

L'indice de plasticité est inférieur à 21 avec une moyenne à 12. Comme pour la fondation, il s'agit une argile relativement peu plastique dont les caractéristiques se rapprochent beaucoup des halloysites (Fig. 5).

Synthèse des caractéristiques géotechniques de la zone d'emprunt est présentée dans le [tableau 3](#).

7.3 Conclusion

La kaolinite et l'halloysite sont de bons matériaux pour la construction du barrage. Il s'agit d'argiles peu actives, c'est-à-dire peu sensibles au retrait et gonflement en présence d'eau, et qui sont également moins plastiques que les allophanes, ce qui est favorable.

La teneur en eau naturelle étant supérieure à la teneur en eau à l'OPN, il est nécessaire de préparer et drainer la zone d'emprunt pour atteindre l'objectif avant compactage.

8 Définition des conditions de mise en place des matériaux

8.1 Planches d'essai et procédure de compactage

Une douzaine de planches d'essais de compactage ont été réalisées en début de chantier pour déterminer la méthode de mise en œuvre des remblais.

Ainsi, la procédure de compactage adoptée est la suivante : compactage par couches de 30 cm d'épaisseur, en 4 passes de compacteur V4 ou V5 à pieds dameurs (selon l'état hydrique).

8.2 Dispositions prises pour maîtriser la teneur en eau des matériaux avant compactage

Les dispositions suivantes ont été mises en œuvre pour maîtriser la teneur en eau des matériaux avant compactage, pour une mise en œuvre proche de W_{OPN} (afin de respecter les critères de contrôle des matériaux après mise en œuvre) :

- extraction en front vertical pour assurer une homogénéisation des teneurs en eau et minimiser l'impact des pluies sur les surfaces mises à nu ;
- drainage des matériaux dans la zone d'emprunts avec la création de fossés périphériques (pour limiter les infiltrations en périodes pluvieuses et emmener les eaux vers l'extérieur de la zone de travail) et d'un plan d'aménagement phasé de la zone d'emprunts (casiers avec connaissance des stocks par catégorie de teneurs en eau), pour permettre d'extraire les matériaux avec une teneur en eau se rapprochant le plus de l'OPN ;
- fermeture systématique de la zone au rouleau lisse après extraction de matériaux pour éviter l'infiltration en cas de pluies ;
- dépotage des matériaux à l'aide de tracteurs ou des tombereaux afin d'éviter les ornières sur la zone de remblai ;
- réglage des matériaux aux bulls sur une épaisseur de 30 cm et griffage des matériaux avec la herse du bull pour les aérer et diminuer la teneur en eau si nécessaire.

8.3 Critères d'acceptation des matériaux

Les critères d'acceptation des matériaux mis en œuvre, à l'extraction et après compactage, sont les suivants :

À l'extraction :

- granulométrie

- 100 % < 10 mm
- 0 à 30 % > 5 mm
- 50 % < 80 μ m ;

Après compactage :

- masse volumique sèche mesurée : $\rho_d > 95\%$ $\rho_{d,OPN}$ pour chacun des essais réalisés, avec une moyenne > 97 % $\rho_{d,OPN}$;
- densité : $d > 1$ ($\rho_d > 1000$ kg/m³) pour chacun des essais réalisés ;
- perméabilité en place : valeur « objectif » de $K = 5 \times 10^{-8}$ m/s pour la recharge amont-noyau et $7,5 \times 10^{-8}$ m/s pour la recharge aval.

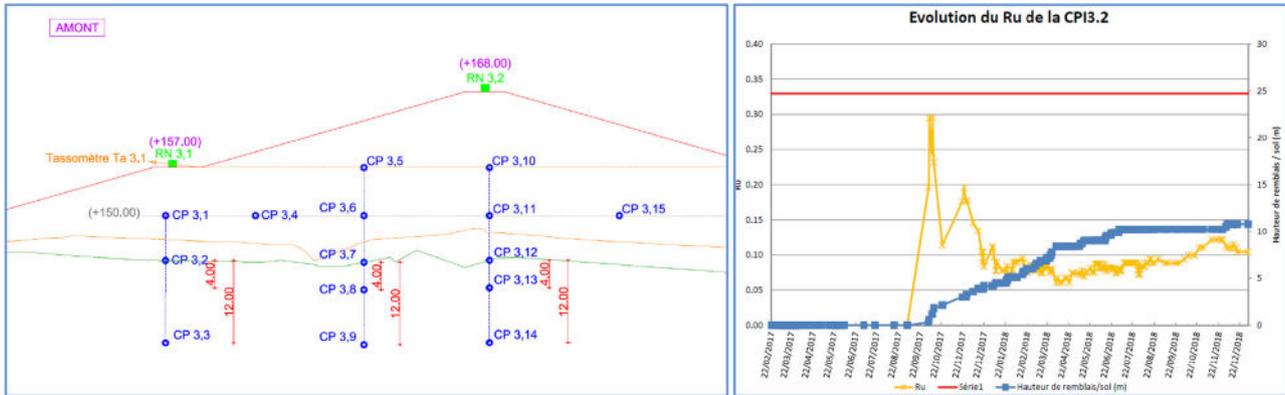


Fig. 6. Extrait d'un profil d'auscultation et exemple de courbe d'évolution du Ru en fonction de la hauteur du remblai.
Fig. 6. Monitoring profile and Ru evolution curve according to the embankment height.

Teneur en eau des matériaux d'emprunts : l'objectif initial était une teneur en eau comprise entre $W_{opt} - 2\%$ et $W_{opt} + 2\%$.

La teneur en eau naturelle élevée des matériaux de la zone d'emprunt et les conditions météorologiques souvent humides ont conduit à considérer la possibilité de mettre en œuvre les matériaux avec une teneur en eau plus élevée.

Ainsi, le retour d'expérience sur le comportement des matériaux acquis lors des premières phases de remblais sur Moreau a permis de constater qu'il est possible de mettre en remblais des matériaux jusqu'à $W_{opt} + 6\%$ en respectant les critères de densité citées plus haut.

Il a été constaté qu'il est possible de perdre environ 4 points entre la teneur en eau naturelle du matériau au prélèvement, le transport, le réglage et l'aération sur la plateforme. Il est donc possible de respecter les critères de remblais avec un matériau $W_{nat} = W_{opt} + 10\%$, à condition de le travailler avant le compactage.

L'excès d'eau en remblai peut cependant avoir 2 conséquences :

- les difficultés ou l'impossibilité de traficabilité des engins, mais cela vaut généralement pour un gros excès et se voit très vite. Les mesures adéquates doivent donc être prises par l'entreprise en charge des travaux : substitution ou aération en place des matériaux ;
- une génération des pressions interstitielles qui est contrôlée par les mesures fréquentes des cellules de pressions interstitielles en fondation et en remblai (si $R_u >$ valeur seuil définie par le calcul : arrêt de la montée du remblai dans l'attente des dissipations des pressions).

En conséquence, les mesures mises en œuvre sur le chantier ont consisté, d'une part, à réduire au maximum la teneur en eau du matériau avant compactage (en grande partie attribuable au drainage naturel) et, d'autre part, à assurer le suivi permanent de la valeur des pressions interstitielles et des tassements du remblai.

9 Auscultation du remblai en cours de construction

Globalement, le matériau *in situ* présente une teneur en eau nettement supérieure à l'Optimum Proctor Normal, même en réalisant le séchage à basse température (55°), pour maintenir



Fig. 7. Photo aérienne du chantier (mars 2019).
Fig. 7. View of the dam construction (march 2019).

l'eau structurelle de l'éventuelle halloysite. Durant la construction, le matériau est mis en place au bull et compacté au rouleau vibrant. Sous l'effet de la montée du remblai, la contrainte verticale augmente et comprime le matériau. L'indice des vides diminue et il arrivera un moment (qui se compte en hauteur de remblai au-dessus du point de mesure) où les vides remplis d'air seront réduits à rien, l'eau remplira tous les vides laissés libres par le solide et la pression interstitielle augmentera. Si la pression interstitielle atteint la valeur de la masse de remblai placée au-dessus, le remblai est porté par l'eau qui ne résiste pas au cisaillement et la masse glisse en cours de chantier (par annulation des contraintes effectives). C'est cela qu'il faut éviter.

On pourrait avoir l'impression que le risque est limité car les parois des tranchées réalisées pour les sondages ont résisté sans altération pendant plusieurs mois malgré la pluie ; la rive droite coupée en pied sans précaution s'accommode également de la pluie sans que des glissements ne se déclenchent. C'est bien la preuve que le matériau une fois en place se comporte bien malgré sa faible densité, mais ce n'est pas la preuve qu'il

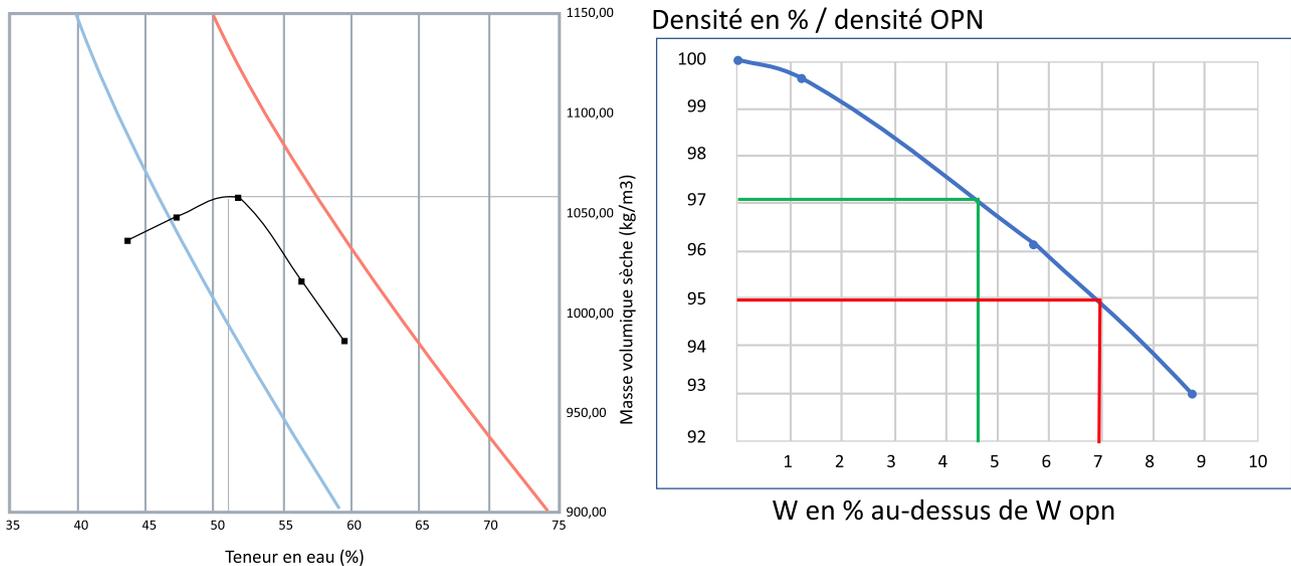


Fig. 8. Courbe Proctor de référence (zone d'emprunt).

Fig. 8. Proctor curve (before extraction).

se comporte bien lorsqu'il est saturé. Dans le fond des tranchées où de l'eau est présente, le matériau résiste beaucoup moins bien. Il semble que, dans ces matériaux, encore plus que dans les matériaux granulaires, la tension capillaire et les petits ménisques entre les grains font tenir les talus comme ils font tenir les châteaux de sable, jusqu'à ce que le matériau sèche ou soit saturé.

À cet effet, il a été prévu 62 cellules de pressions interstitielles (CPI), disposées dans le remblai pour permettre de suivre les variations de pression interstitielle et 3 profilomètres permettant notamment de suivre les tassements du remblai.

Les cellules de pression interstitielle ont été réparties comme suit :

- 18 dans le remblai ;
- 14 au contact remblai/fondation ;
- 30 en fondation.

Les profilomètres sont disposés :

- 2 en fondations (profil PA2 et PA3) ;
- 1 en remblai (profil PA3) ;

En parallèle des levés des profilomètres, un relevé des repères de nivellement à l'intérieur du dalot est réalisé. Des repères de nivellement seront également installés à terme sur le corps du barrage et en crête (Fig. 6).

Le coefficient R_u est le rapport entre l'accroissement de la pression interstitielle et l'accroissement de la contrainte apportée par le remblai. Depuis le début de la montée des remblais, les valeurs de R_u restent sous le seuil limite fixé par les calculs de stabilité (soit 0,33). Il est à noter que la vitesse de montée des remblais a été assez modeste, comme indiqué dans le paragraphe suivant.

Le tassement mesuré depuis le début de la montée des remblais est de 6 cm dans l'axe du barrage (sous dalot) à fin mars 2019.

10 Avancement du chantier à fin 2018 et retour d'expérience de la montée des remblais

Les remblais ont débuté en octobre 2016. À fin 2018, 300 000 m³ de remblai ont été mis en œuvre, à une cadence d'environ 700 m³/j, sur les 580 000 m³ de remblai total, ce qui correspond à une hauteur de 14 m en amont et entre 9 et 15 m en aval. Les travaux ont été fortement perturbés par les intempéries (environ 120 jours d'intempéries depuis le début du chantier) (Fig. 7).

Le retour d'expérience sur le comportement des matériaux acquis lors des premières phases de remblais sur Moreau permet de dire qu'il est possible de mettre en remblais les matériaux avec des teneurs en eau beaucoup plus élevées que ce que l'on constate habituellement sur les sols fins classiques ($W_{opn} + 6\%$), sans que l'objectif de densité du matériau compacté n'en soit affecté. De plus, les perméabilités mesurées des matériaux argileux mis en œuvre oscillent entre 10^{-11} et 10^{-8} m/s, avec une moyenne située à environ $1,2 \cdot 10^{-8}$ m/s.

11 Présentation d'un exemple de mise en oeuvre

Un exemple est présenté ci-après comprenant la référence Proctor, la teneur en eau avant mise en œuvre, et les résultats de contrôle de compactage (pour un même matériau).

La courbe Proctor de référence présentée sur la figure 8, indique :

- densité sèche à l'OPN : 1,06 t/m³ ;
- teneur en eau à l'OPN : 50,8 %.

au comportement des matériaux fins peu plastiques saturés d'eau. Une fois retirés, les alluvions ou colluvions de pente sur les rives et une fois excavée la partie superficielle très altérée (jusqu'à 6 m de hauteur de purge), la roche est tendre et compacte. Elle constitue une bonne fondation pour un barrage de 30 m de hauteur.

Une tranchée drainante est placée dans l'axe du barrage en fond de vallée pour assurer le drainage de la couche superficielle de la fondation. La forte pente de la rivière permet d'implanter assez bas cette tranchée drainante. Le SES (séisme d'évaluation de la sécurité) a été étudié en détail. Le barrage de Moreau se comporte de manière acceptable pour un tel séisme.

Le remblai lui-même est constitué des matériaux superficiels séchés à l'air libre si nécessaire et compactés au rouleau vibrant à pied dameur. Ces matériaux constituent de bons matériaux de remblai pour le barrage. Les planches d'essais et l'expérience de la mise en œuvre de ces remblais ont montré qu'il est possible d'obtenir un compactage conforme aux critères, avec des teneurs en eau qui peuvent aller jusqu'à +6% par rapport à la teneur en eau à l'OPN.

Références

Atlan Y, Feller C. Contribution à l'étude des propriétés physiques et géotechniques des sols issus de matériaux volcaniques des Antilles françaises. Fort de France: BRGM, (84.ANT.004), 1984, 34 p.

BRGM. Irrigation de la côte au vent. Reconnaissances complémentaires du site du barrage de Moreau à Goyave (R32847ANT4S91), 1991b.

Casagrande A. 1948. Classification and identification of soils. *Transaction, ASCE* 113: 901–930.

de Reynal de Saint-Michel A. Notice explicative des feuilles de Basse-Terre et des Saintes, 1966.

Dixon HH, Robertson RHS. 1970. Some engineering experiences in tropical soils. *Q J Eng Geol Hydrogeol* 3(3): 137–150.

GEOMAT . 2005. Reconnaissance des sols. Rapport N° 05-8234-A/DS/CF.

ITASCA . Modélisation numérique du barrage de Moreau, pour l'analyse de sa stabilité en conditions dynamiques, 2016, 224 p.

Kalenda GM. Comportement des sols latéritiques compactés dans les remblais et digues de retenue des rejets miniers du Katanga (RDC). Thèse de doctorat. Belgique: École Polytechnique de Louvain, 2014.

Mitchell JK. Fundamentals of soil behavior. New York: Edition J. Wiley, 1976, 422 p.

Samper A. Étude géochronologique, aspects géomorphologiques et géochimiques du volcanisme de l'île de Basse Terre (Guadeloupe), et datation des structures d'effondrement de flanc majeures de l'Arc des Petites Antilles. Géologie appliquée. Université Paris Sud – Paris XI, 2007.

Terzaghi K. 1958. Design and performance of the Sasumua dam. *Proc Brit Inst Civ Eng* 98(4): 369–394.

Zemenu GY. Analyse des processus de retrait-gonflement de sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques : rôle de la microstructure. Planète et Univers [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009. Français.

Citation de l'article : Patrick Soulat, Stephen Bonnet, Mathieu Le Floch, Bernard Tardieu, Daniel Billaux, Claudio Carvajal, Géraldine Rougier, Alain Pecker. L'utilisation de sols résiduels tropicaux dans la construction du barrage de Moreau (Guadeloupe). Rev. Fr. Geotech. 2019, 160, 3.