

# MODELISATION NUMERIQUE DE LA STABILITE DU BARRAGE DE MOREAU EN CONDITIONS DYNAMIQUES

## NUMERICAL MODELING OF MOREAU DAM STABILITY IN DYNAMIC CONDITIONS

**Daniel BILLAUX, Rima GHAZAL**

Itasca Consultants, 64 chemin des Mouilles, 69130 Ecully

[d.billaux@itasca.fr](mailto:d.billaux@itasca.fr) ; [r.ghazal@itasca.fr](mailto:r.ghazal@itasca.fr)

**Patrick SOULAT, Stephen BONNET, Mathieu Le FLOCH**

Suez Consulting, ZAC de Colin, 97170 Petit Bourg - Guadeloupe

[patrick.soulat@suez.com](mailto:patrick.soulat@suez.com) ; [stephen.bonnet@suez.com](mailto:stephen.bonnet@suez.com) ; [mathieu.lefloch@suez.com](mailto:mathieu.lefloch@suez.com)

### MOTS CLEFS

Modélisation dynamique, FLAC, Modèle de liquéfaction, Barrage en remblai

### KEY WORDS

Dynamic calculation, FLAC, Liquefaction model, Embankment dam

### RÉSUMÉ

*Le barrage de Moreau est en cours de construction en Guadeloupe (Basse Terre-commune de Goyave). C'est un barrage en remblai de 27 m de hauteur, pour un volume de stockage d'environ 1hm<sup>3</sup>. La fondation est constituée de roches altérées d'origine volcanique : coulée andésitique et projections pyroclastiques (lapillis). Les mêmes lapillis, issus du site, constituent le remblai.*

*Le barrage et sa fondation ont été modélisés aux Différences Finies (FLAC), en intégrant la génération des pressions interstitielles sous séisme. Le calcul d'initialisation statique a été mené en conditions drainées, sans génération de pressions interstitielles durant la construction. Pour le régime dynamique, la loi de comportement PM4Sand a été adoptée. PM4Sand est un modèle de plasticité du sable pour des applications de génie sismique implémenté dans FLAC. Il a été développé dans le cadre théorique présenté par Dafalias et Manzari (2004), avec une surface de plasticité contrôlée par un rapport de contrainte, compatible avec la notion d'état critique. Il a été calibré sur la base des résultats d'essais triaxiaux cycliques réalisés sur le substratum de fondation.*

*Les résultats des calculs ont amené à adapter la conception du barrage, en simplifiant sa géométrie, en purgeant les cinq premiers mètres de fondation dans le fond de vallée (alluvions et substratum très altéré), et en renforçant le drainage de la fondation aval.*

### ABSTRACT

*The Moreau dam is located in Guadeloupe (Basse Terre-commune of Goyave). The 27 m high embankment, with a storage volume of approximately 1 million cubic meters, is currently under construction. The foundation consists of volcanic rocks : andesitic flow and pyroclastic projections (lapillis). The embankment material is made of the same lapillis.*

*The dam and its foundation were modelled by Finite Differences (FLAC), integrating pore pressure generation under earthquake. For static initialization, drained conditions were assumed. For the dynamic simulation, the PM4Sand constitutive law was adopted. PM4Sand is a sand plasticity model for geotechnical seismic engineering applications implemented in FLAC. Its theoretical framework (Dafalias and Manzari, 2004), includes a plasticity surface controlled by a stress ratio, compatible with the notion of critical state. It was calibrated based on the results of cyclic triaxial tests carried out on the foundation substratum.*

*The results of the calculations led to adapting the design of the dam, simplifying its geometry, purging the first five meters of foundation in the valley floor (alluvium and heavily weathered bedrock), and strengthening the drainage of the downstream foundation.*

## 1. INTRODUCTION

Le barrage de Moreau, porté par le Conseil Régional de Guadeloupe, est un barrage en remblai en cours de construction (mise en eau prévue fin 2019). Sa hauteur finale sera de 27 m au dessus du terrain naturel. Le comportement du barrage et de sa fondation a été simulé (logiciel FLAC) en statique (construction du barrage) puis en dynamique (passage d'un séisme), en prenant en compte le potentiel de liquéfaction *via* le modèle de comportement PM4Sand. Le barrage s'est avéré instable sous sollicitations sismiques. Une conception modifiée a alors été testée : géométrie simplifiée, purge de 5 à 6 m d'alluvions et du substratum très altéré dans le fond de vallée, drainage aval renforcé. La simulation numérique de la nouvelle conception a permis de démontrer la stabilité du barrage, avec des désordres limités à la face aval.

## 2. GEOMETRIE ET GEOLOGIE

Le barrage est constitué par un noyau argileux entouré de remblai (transitions drainée et non drainée). La fondation comprend une couche d'alluvions sur une couche de substratum résiduel (lapillis) très altérée, puis altérée (Figure 1).

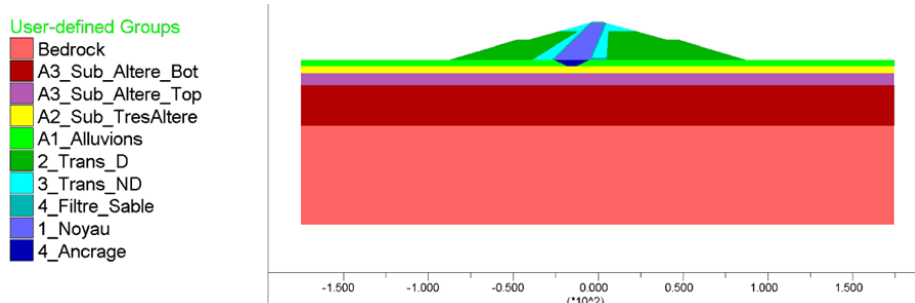


Figure 1 : Matériau constituant le barrage et sa fondation (conception initiale).

## 3. MODELES DE COMPORTEMENT

### 3.1. Loi de comportement en régime quasi-statique

Pour la construction du barrage, les matériaux du barrage et de la fondation (excepté le rocher) sont considérés élastiques non linéaires, avec un critère de rupture de Mohr Coulomb. Le rocher est supposé élastique.

Le module de cisaillement dépend de la contrainte de confinement (équation 1).

$$G_{stat} = G_{0,stat} p_{atm} \sqrt{\sigma'_c / p_{atm}} \quad (1)$$

Avec  $p_{atm}$  la pression atmosphérique ;

$\sigma'_c$  la contrainte effective de confinement ; et

$G_{0,stat}$  un coefficient sans dimension ( $G_{stat} = G_0 p_{atm}$  pour  $\sigma'_c = p_{atm}$ ).

### 3.2. Loi de comportement en dynamique

Le modèle PM4sand (Dafalias et Manzari 2004) possède une surface de plasticité contrôlée par un rapport de contrainte, compatible avec la notion d'état critique. La formulation complète est détaillée par Boulanger et Ziotopoulou (2015).

La surface de plasticité est représentée sur le plan  $q/p'$  des contraintes par un cône illustré en Figure 2,  $q$  étant la contrainte déviatorique et  $p'$  la pression effective. La loi d'écoulement est non-associée et séparée en une composante déviatorique et une composante volumique.

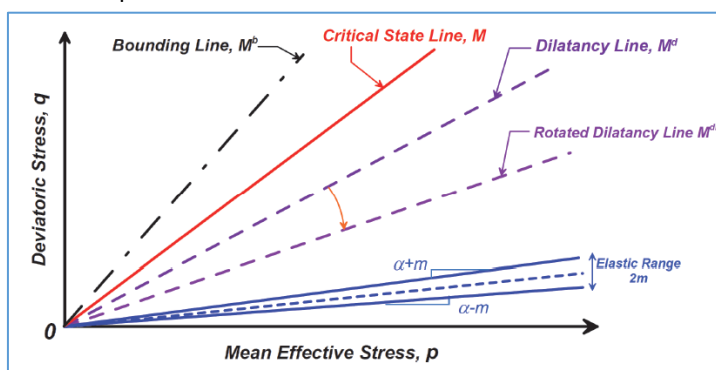


Figure 2 : Schématisation des frontières de plasticité, d'état critique, de dilatance et de l'enveloppe limite.

Les déformations déviatoriques sont calculées via un module plastique basé sur la distance entre le rapport de contrainte  $q/p'$  courant et la surface limite (« bounding surface » en Figure 2).

Une dilatance régit le rapport entre déformations volumiques et déviatoriques. Son signe est contrôlé par la distance à la surface de dilatance. L'accumulation des déformations est régie par un tenseur de microstructure, qui modifie module plastique et dilatance pour mieux prédire les déformations dues au chargement cyclique.

Les paramètres primaires du modèle PM4sand sont

- $D_R$  : densité relative apparente ;
- $G_{0,dyn}$  : coefficient de cisaillement (voir paragraphe ci-dessous) ;
- $h_{p0}$  : paramètre du taux de contraction ajusté pour obtenir le rapport de résistance cyclique désiré.

Pour les 18 paramètres secondaires, FLAC assigne des valeurs par défaut, vérifiables par des essais de calibration sur un élément volumique. Ces paramètres sont détaillés dans Boulanger et Ziotopoulou (2015).

#### 4. PROPRIETES DES MATERIAUX ET CALIBRATION DU MODELE PM4SAND

Deux types d'essais sont réalisés afin de mesurer les propriétés physiques des différents constituants :

- Essais triaxiaux cycliques sur les matériaux du remblai, les alluvions et le substratum très altéré (sondages). Ils sont réalisés pour des déformations de 0.1% et à de forts confinement (200 à 400 kPa).
- Mesures des vitesses des ondes S (GEOTER, rapport GTR/SAS/1112-1002)

Les paramètres du module statique sont estimés à partir des essais triaxiaux cycliques.

Les modules de cisaillement dynamique de la fondation sont calculés sur la base du profil des vitesses des ondes S. Le profil montre des terrains tout à fait médiocres dans les 10 premiers mètres. Une valeur  $G_{0,dyn}$  est associée à chacun des matériaux de la fondation, via une relation similaire à l'équation 1,  $G_{dyn} = G_{0,dyn} p_{atm} \sqrt{\sigma'_c / p_{atm}}$ .

Pour le remblai, en l'absence de données, le module dynamique est simplement déduit du module statique par  $\frac{G_{dyn}}{G_{stat}} = 2.0$ . En effet le module dynamique de cisaillement relatif à des déformations de cisaillement de l'ordre de 0.001% est généralement 2 à 3 fois supérieur au module statique de cisaillement relatif à des déformations de l'ordre de 0.1%. Par ailleurs, pour le substratum altéré et pour le rocher, aucun essai cyclique n'a été réalisé. Le module de cisaillement statique est donc déduit du module dynamique, en utilisant la même relation. Les propriétés « statiques » et « dynamiques » sont données en Tableau 1.

Le module  $G_{dyn}$  est utilisé lors du calibrage du modèle PM4sand. Des essais cycliques numériques sont réalisés en appliquant le confinement utilisé au laboratoire. La Figure 3 montre un exemple de calage des résultats pour le remblai. Les résultats expérimentaux et numériques sont en bon accord pour les CSR les plus faibles. Une divergence est observée entre les résultats numériques et expérimentaux pour CSR > 0.3.

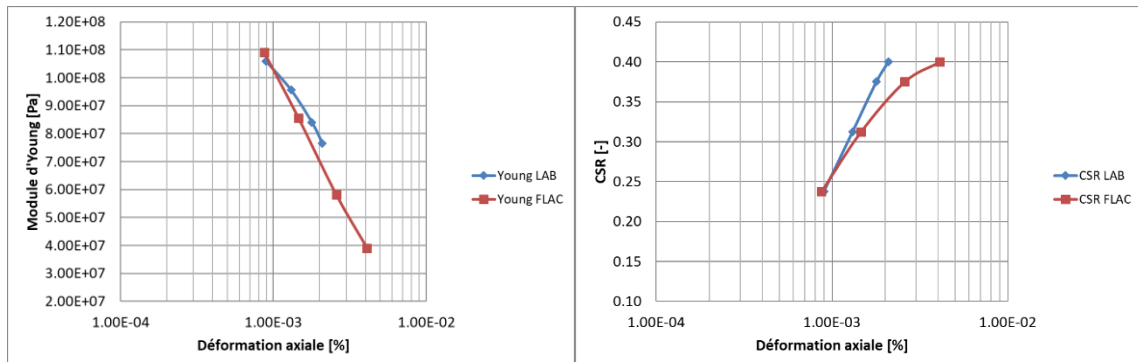


Figure 3 : Calibration du modèle PM4Sand – Comparaison des résultats numériques avec les mesures de laboratoire sur les matériaux du remblai – Module d'Young vs Déformation axiale (gauche) et CSR vs déformation axiale (droite).

Tableau 1 : Propriétés statiques et dynamiques pour les matériaux du remblai et de la fondation.

	$\phi$ [°]	$\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosit $\epsilon$ [-]	$G_0$ stat [-]	$G_0$ dyn [-]	$G_{dyn}$ [MPa]	$K_{dyn}$ [MPa]
Noyau	2 9	1106	0.55	299.1	700	68.8	196.2
Filtre de sable	3 5	1800	0.35	1749.6	3499.2	344.0	745.3
Transition non drainante	2 9	1106	0.55	299.1	700	68.8	196.2
Recharge drainante	3 1	1106	0.55	299.1	700	68.8	196.2
Alluvions (F1)	3 0	1118	0.58	186.5	388	11.7	25.4
Substratum très altéré	3 3	1104	0.59	288.7	388	21.3	46.2
Substratum altéré (<15 m)	3 8	1002	0.62	852.7	1705.4	124.3	269.3
Substratum altéré (>15m)	3 8	1002	0.62	2052.2	4104.4	418.8	907.4

## 5. SIMULATION DE LA CONSTRUCTION DU BARRAGE

La construction est simulée par couches d'environ 3m d'épaisseur. Le niveau d'eau est maintenu à la surface de la fondation. La construction est simulée en conditions drainées. Le réservoir est ensuite rempli par pas d'environ 3m jusqu'au niveau PHE (Plus Hautes Eaux). A chaque étape, les modules de compressibilité et de cisaillement sont mis à jour à partir de la contrainte de confinement.

## 6. SIMULATION DYNAMIQUE

### 6.1. Conditions aux limites

Des frontières absorbantes sont utilisées à la base du modèle et sur les limites latérales afin d'empêcher les réflexions.

Des conditions « de champ infini » sont en plus appliquées aux limites latérales.

Le signal d'entrée est appliqué sous forme d'un historique de contraintes (verticales et de cisaillement) à la base du modèle suivant les relations

$$\sigma_n = 2 \rho C_p V_n \quad (2)$$

$$\sigma_s = 2 \rho C_s V_s \quad (3)$$

avec  $V_n$  et  $V_s$  les vitesses à appliquer,  $\rho$  la masse volumique,  $C_p$  et  $C_s$  les vitesses des ondes  $P$  et  $S$  respectivement.

Le facteur deux est nécessaire car le signal qui se propage dans le demi-espace supérieur (dans le modèle) est égal à la moitié du signal imposé en entrée.

### 6.2. Résultats

Nous montrons ici les deux principaux phénomènes d'instabilité observés (Figure 4):

- A l'amont, une concentration de la déformation de cisaillement démarre au pied du talus, et se propage jusqu'à la berme (côte 12.5m).
- Dans le barrage, dans la fondation et en correspondance du talus à l'aval, un large phénomène d'instabilité est observé, se propageant en profondeur jusqu'à l'interface entre le substratum altéré et le rocher. Une bande de cisaillement est observée le long de l'interface entre substratum très altéré et substratum altéré.

On étudie également les résultats à un instant du séisme (après 7s) où la sollicitation est relativement importante. La Figure 5 montre la contrainte effective verticale, fournissant un ordre de grandeur du niveau de confinement des matériaux ainsi que la valeur du déviateur des contraintes. Les résultats en terme de déformation de cisaillement (Figure 4, gauche) sont en accord avec les tests numériques (et au laboratoire) qui montrent que le comportement du matériau (alluvions et substratum très altéré) devient fortement irréversible pour un déviateur au-delà de 150 kPa et pour un confinement de 300 kPa pour les alluvions et le substratum très altéré (Figure 5).

On présente par ailleurs les contours du rapport  $r_u$  (rapport entre la pression de pores et la pression de confinement) après le passage du séisme, qui montre l'absence de liquéfaction dans l'ensemble de la fondation (valeurs inférieures à 1). Le rapport  $r_u$  atteint cependant des valeurs maximales de 0.8 au niveau de la couche d'alluvions en amont et en aval du barrage.

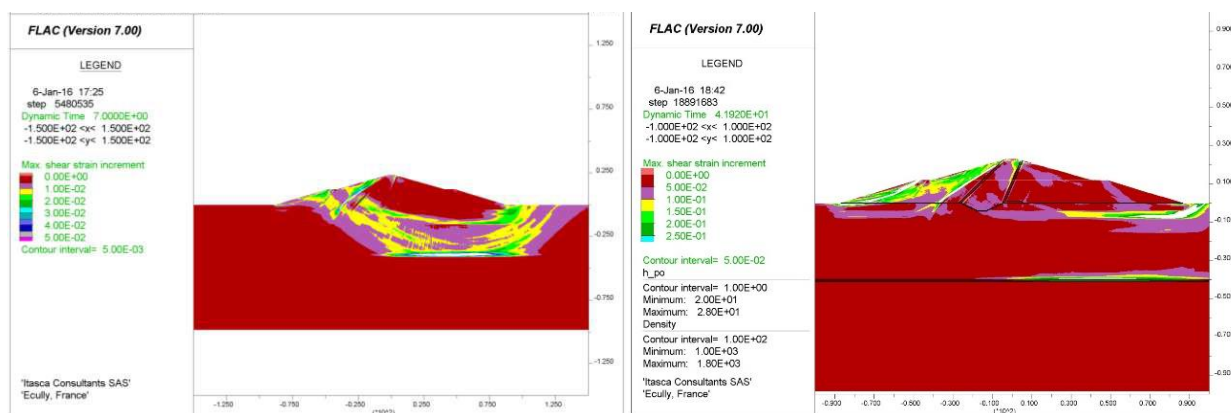


Figure 4 : Incréments de la déformation de cisaillement après 7s (gauche) et après le passage du séisme (droite).

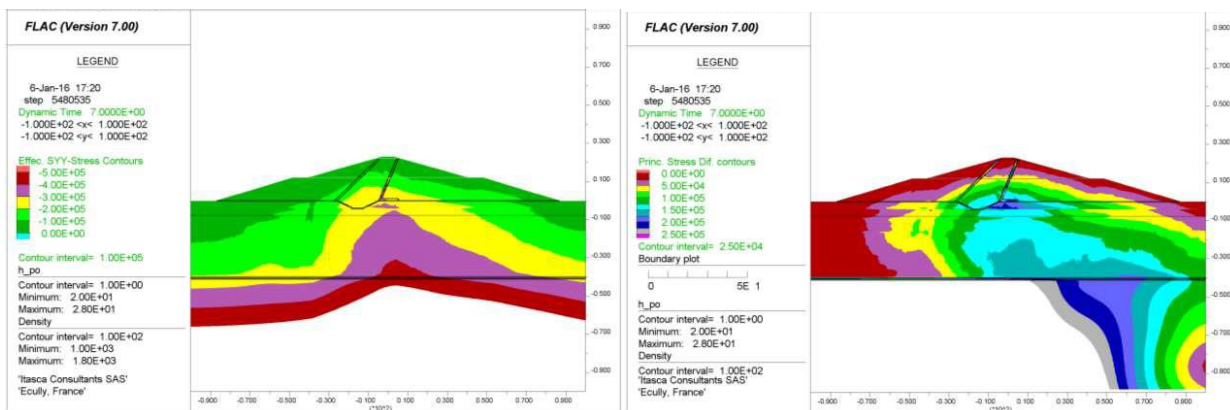


Figure 5 : Contrainte effective verticale (gauche) et déviateur des contraintes (droite), après 7s de séisme.

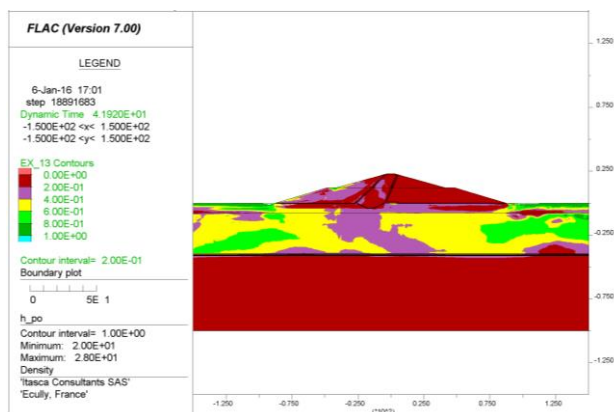


Figure 6 : Contour du rapport  $\tau_x$  après passage du séisme.

## 7. MODIFICATION DE LA CONCEPTION

### 7.1. Nouvelle géométrie

La nouvelle géométrie du barrage est montrée en Figure 7. Pour l'essentiel, la géométrie est simplifiée (noyau vertical), la couche d'alluvions et de substratum très altéré (cinq premiers mètres de la fondation) est découpée sous le barrage et un drain est réalisé en pied (à l'aval du barrage) et à l'interface entre la limite aval du noyau et le remblai.

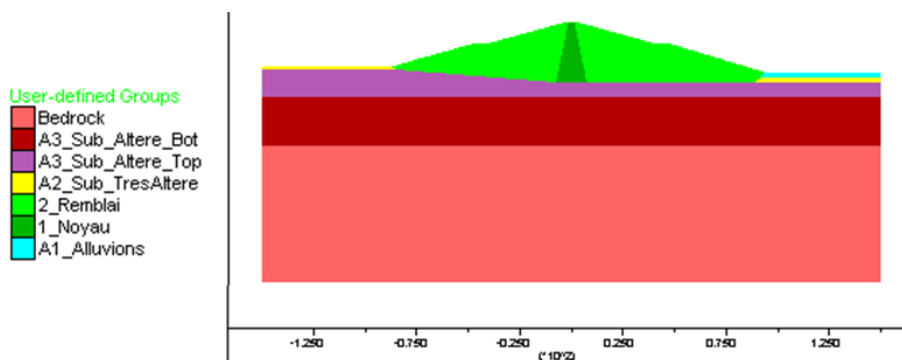


Figure 7 : Matériaux constituant le barrage et sa fondation (nouvelle conception).

## 7.2. Résultats avec la nouvelle conception

Avec la nouvelle conception, seul subsiste un glissement de peau, d'épaisseur métrique, sur la face aval (Figure 8). Le reste du barrage subit des déformations irréversibles inférieures à 2%. Après 7s de séisme, les déformations de cisaillement dans la fondation restent inférieures à 0.1%, et la contrainte verticale effective est pour l'essentiel supérieure à 200kPa.

La seconde conception réduit le déplacement en crête de plus de 75% (Tableau 2). Elle assure la stabilité du barrage pour les séismes de projet, avec apparition de désordres limités sur la face aval.

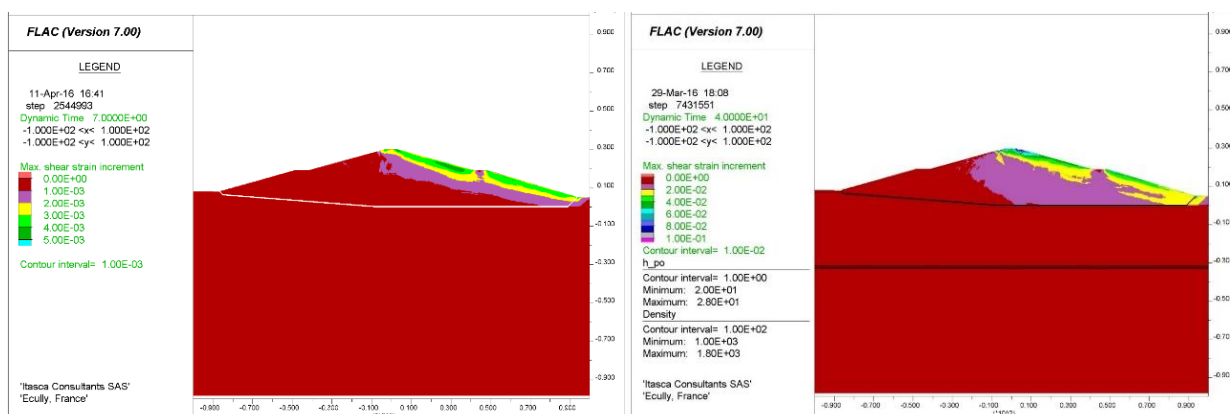


Figure 8 : Incréments de la déformation de cisaillement après 7s (gauche) et après passage du séisme (droite).

Tableau 2 : Comparaison des déplacements en milieu de crête pour la première et la deuxième conception .

	PGA (ms <sup>-2</sup> )		Déplacement milieu de la crête [m]	
	V	H	Vertical	Horizontal
Première conception	4.38	3.91	-2.18	2.93
Deuxième conception			-0.32	0.65

## 8. CONCLUSION

La modélisation numérique de la stabilité du barrage de Moreau a montré l'inadéquation de la conception initiale et a permis de proposer et de valider une nouvelle conception. L'un des points conditionnant la stabilité était l'éventuelle liquéfaction des matériaux de la fondation. L'utilisation du modèle PM4sand a permis de lever cette hypothèse. Ce modèle 2D, d'utilisation et de calibration relativement aisées, reproduit en effet le phénomène de montée en pression lors d'un séisme de manière réaliste.

## REMERCIEMENTS

Rémerciements à Jean-Pierre BECUE et Bernard TARDIEU pour leur expertise.  
Merci à Pierre HALLEY et au Conseil Régional de Guadeloupe, qui porte ce projet.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Dafalias, Y.F., and Manzari, M, T. (2004). Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 130(6), 622-634.
- [2] Boulanger, R.W. and Ziotopoulo K. (2015). PM4SAND (Version 3) : a sand plasticity model for earthquake engineering applications. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Davis. Report No. UCDC/CGM-15/01.
- [3] GEOTER SAS, Pole Geo-Environnement, Evaluation des mouvements sismiques, Projet de barrage de Moreau, Goyave, Guadeloupe, Rapport GTR/SAF/1112-1002.
- [4] GEOTER SAS, Pole Geo-Environnement, Classification sismique de site, barrage de Moreau – Guadeloupe. Rapport GTR/SAS/0316-1441.
- [5] ANTEA GROUP Guadeloupe, Rapport d'essais de laboratoire, barrage de Moreau à Goyave. *Rapport Lab16021*.