

Mamoudzou (Mayotte)

Analyse du potentiel de liquéfaction au droit du projet d'extension de la station d'épuration du Baobab

Rapport final

BRGM/ RP-55197-FR
décembre 2006

Mamoudzou (Mayotte)

Analyse du potentiel de liquéfaction au droit du projet d'extension de la station d'épuration du Baobab

Rapport final

Etude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM 06PIRA19

BRGM/RP-55197-FR
décembre 2006

JL. Nédellec

Vérificateur :

Nom : Rémi MOURON

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : P. ROUBICHOU

Date :

Signature :

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Mamoudzou, Mayotte, Station d'épuration, Liquéfaction

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

JL. Nédellec (2006) – "Mamoudzou (Mayotte) – Analyse du potentiel de liquéfaction au droit du projet d'extension de la station d'épuration du Baobab" – BRGM/RP-55197-FR - 27 p., 3 illustrations, 4 tableaux.

© BRGM, 2006, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

A la demande et pour le compte du SIEAM (Syndicat Intercommunal pour l'Eau et l'Assainissement de Mayotte), le BRGM a examiné le potentiel de liquéfaction des sols au droit du projet d'extension de la station d'épuration de Mamoudzou.

Il convient de souligner que cette étude est basée sur des données partielles dont la finalité n'était pas l'étude de la liquéfaction sur le site :

- étude géotechnique de la première phase de la station d'épuration ;
- étude géotechnique de réalisation du remblai côtier de Mtsapéré (quelques centaines de mètres plus au Sud Ouest).

Seules les vases sablo-argileuses présentes sur le site de projet ont été considérées comme potentiellement liquéfiables.

Conformément aux règles PS 92 – norme NF P 06-013 – les vases du site peuvent liquéfier, ce qui réglementairement doit conduire soit à un traitement de l'horizon vulnérable soit à un renforcement des fondations. Toutefois, les calculs d'intensité de liquéfaction montrent qu'en cas d'occurrence du séisme de référence (hypothèse purement indicative issue de l'étude de Mtsapéré et ne pouvant être utilisée pour la construction des ouvrages), les effets en surface de la liquéfaction devraient rester modérés.

Par conséquent, nous recommandons d'adopter des dispositions constructives légères au droit du site de projet, ces dispositions étant énoncées au chapitre 4.2.5.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Données exploitées.....	9
3. Contexte géotechnique.....	11
3.1. STRATIGRAPHIE ET LITHOLOGIE.....	11
3.2. HYPOTHESES GEOTECHNIQUES.....	11
3.3. NIVEAU D'EAU	12
4. Potentialités de liquéfaction.....	13
4.1. DEFINITION ET METHODE.....	13
4.1.1. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction.....	14
4.1.2. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction	15
4.2. APPRECIATION DES POTENTIALITES DE LIQUEFACTION DU SITE D'ETUDE.....	19
4.2.1. Formations à analyser.....	19
4.2.2. Contexte hydrogéologique.....	19
4.2.3. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction.....	19
4.2.4. Susceptibilité quantitative et opportunité à la liquéfaction.....	23
4.2.5. Préconisations en terme de dispositions constructives.....	25
5. Conclusions	27

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation du projet (fond IGN)	7
Illustration 2 – Abaque de Seed.....	16
Illustration 3 - Courbes granulométriques des vases limono-sableuses de Mtsapéré.....	20

Liste des tableaux

Tableau 1 – Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92) dans les vases de Mtsapéré	21
Tableau 2 – Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92) dans les vases du projet d'extension de station d'épuration	22
Tableau 3 – Paramètres retenus pour le calcul de liquéfaction	23
Tableau 4 – Calcul de l'intensité de liquéfaction.....	24

1. Introduction

A la demande et pour le compte du SIEAM (Syndicat Intercommunal pour l'Eau et l'Assainissement de Mayotte), le BRGM a examiné le potentiel de liquéfaction des sols au droit du projet d'extension de la station d'épuration de Mamoudzou.



Illustration 1 – Localisation du projet (fond IGN)

Il s'agit, sur la base des éléments fournis par le client et sans procéder à des reconnaissances spécifiques complémentaires, d'apprécier le risque de liquéfaction tant sur le plan qualitatif que quantitatif.

On notera que la représentativité des résultats présentés ci-après se limite à l'interprétation des données disponibles qui n'avaient pas pour finalité de procéder à une étude de liquéfaction. En cas d'obtention d'éléments complémentaires plus appropriés, les conclusions du présent rapport pourront être révisées.

Il s'agit d'une mission de type G51 – diagnostic géotechnique sans sinistre – telle que définie par la norme NF P 94-500.

2. Données exploitées

La présente étude repose sur l'exploitation des données suivantes :

a) Données fournies par le client (éléments issus de l'étude de réalisation de la présente station d'épuration) :

- Avril 98 – rapport Géotechnique et Contrôles n° GC/MY98055/2 – "Station d'épuration à Mamoudzou – Rapport d'étude géotechnique" ;
- Août 99 – courrier Géotechnique et Contrôles n°CF/MY99086 – "Analyse de stabilité des talus en remblai avec carapace et bêche en enrochement" ;
- Août 99 – courrier Géotechnique et Contrôles n°CF/MY99089 – "Dépouillement et analyse des sondages pressiométriques complémentaires".

b) Données d'archives BRGM (étude réalisée à Mtsapéré en front de mer à quelques centaines de m au SW de la station d'épuration) :

- Janvier 2003 – rapport BRGM n° BRGM/RC-52142-FR – "Aménagement du remblai de Mtsapéré - commune de Mamoudzou – Mayotte - Évaluation de l'aléa sismique local".

3. Contexte géotechnique

3.1. STRATIGRAPHIE ET LITHOLOGIE

D'après l'étude Géotechnique et Contrôles d'avril 98, la configuration du site d'étude est la suivante (en extrapolant les résultats obtenus au droit de la station actuelle à l'emplacement du projet d'extension) du sommet vers la base :

- Remblaiement jusqu'à la cote +4 NGM sur environ 2,5 m d'épaisseur moyenne ;
- Présence d'un horizon de vase marine sablo-argileuse de 2,5 m d'épaisseur moyenne, se biseautant lorsque l'on rentre dans les terres ;
- Substratum volcanique altéré que l'on retrouve sous les vases et les remblais.

3.2. HYPOTHESES GEOTECHNIQUES

Les données fournies par Géotechnique et Contrôles dans le rapport de 1998 sont les suivantes (ont été indiqués uniquement les paramètres ayant un intérêt pour l'étude de liquéfaction) :

- Remblai en pouzzolane :

$$\gamma_h = 19 \text{ kN/m}^3$$

Pas de mesure in situ, mais il convient de considérer que la mise en place de ce remblai sera faite dans les règles de l'art ce qui conduira à y écarter tout risque de liquéfaction.

- Vase sablo-argileuse :

$$\gamma_h = 16 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$$

$$w = 75 \text{ à } 80 \% ; w_L = 59 \% ; IP = 22$$

$$p_l \approx 0,06 \text{ MPa}$$

$$q_d < 0,2 \text{ MPa}$$

- Substratum altéré :

$$p_l \approx 0,8 \text{ MPa}$$

$$q_d > 2 \text{ MPa}$$

On notera qu'en ce qui concerne les vases, les valeurs de résistance in situ n'intègrent pas l'existence du remblai final. Cependant, si l'on examine les résultats obtenus lors de la campagne pressiométrique d'août 99, il est possible de constater que sous près de 2 m de remblai, la pression limite des vases varie entre 0,11 et 0,24 MPa. En configuration finale de projet, on pourra donc retenir $p_l = 0,1 \text{ MPa}$ dans les vases sablo-argileuses.

3.3. NIVEAU D'EAU

D'après les données du BCEOM fournies dans le rapport Géotechnique et Contrôles d'avril 98, la cote moyenne du niveau marin (hors houle) se situe vers +0,25 NGM.

4. Potentialités de liquéfaction

4.1. DEFINITION ET METHODE

En géotechnique, on appelle liquéfaction le processus de modification de l'état d'un sol, le faisant passer d'une consistance solide et stable au repos, à un état liquide et instable lors d'une sollicitation dynamique. De manière plus spécifique, la transformation de l'état solide à l'état liquide étudiée dans le cadre du présent rapport se fait par augmentation de la pression interstitielle, lors d'un chargement cyclique consécutif à un séisme.

L'augmentation de la pression interstitielle a pour conséquence une diminution des contraintes effectives régnant dans le sol et donc une diminution de sa résistance au cisaillement qui, à l'état ultime, peut devenir nulle : le sol passe alors à l'état liquide.

Pour qu'il y ait liquéfaction sous l'action d'un séisme, il faut donc :

- qu'il y ait susceptibilité du sol à la liquéfaction, c'est-à-dire qu'il soit plutôt granulaire, dans un état peu compact, peu contraint et situé sous la nappe (exemple des sables ou des limons lâches saturés) ;
- qu'il y ait opportunité à la liquéfaction, c'est-à-dire que l'énergie des ondes émises pendant un séisme soit suffisante, cette énergie étant par exemple traduite sous forme d'une accélération maximale en surface et d'un nombre de cycles équivalents, ces deux paramètres dépendant de la magnitude du séisme et de la distance du site au foyer.

Méthodologiquement, pour estimer l'occurrence de phénomènes de liquéfaction, il convient d'examiner successivement :

- le contexte hydrogéologique, notamment la présence de sols dans un état proche de la saturation ;
- la susceptibilité qualitative (critères d'identification des règles PS 92, norme NF P 06-013) ;
- la susceptibilité quantitative (méthodes basées sur des essais mécaniques *in situ* ou au laboratoire, par exemple Seed *et al.*, 1983) ;
- l'opportunité ou la sollicitation (contexte sismique) ;
- le coefficient de sécurité à la liquéfaction, directement issu des deux points précédents ;
- les potentialités de liquéfaction, *conjonction* du contexte hydrogéologique, de la susceptibilité qualitative et de la valeur du coefficient de sécurité à la liquéfaction ;

- l'intensité de liquéfaction, à partir de l'indice global de liquéfaction permet d'évaluer l'impact de la profondeur et de l'épaisseur des horizons liquéfiables pour une colonne de sol.

4.1.1. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction

Pour des sols courants, les règles PS 92, norme NF P 06-013 précisent les critères d'identification des sols liquéfiables. La susceptibilité à la liquéfaction est avérée quand les critères suivants sont majoritairement vérifiés.

a) Pour les sables, sables vasards et limons :

- critère Sa1 : S_r voisin de 100 % ;
- critère Sa2 : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$, C_u étant ici le coefficient d'uniformité ;
- critère Sa 3 : $0,05 < D_{50} < 1,5mm$;
- critère Sa 4 : En l'état final du projet :
 - $\sigma'_v < 200kPa$ en zones de sismicité Ia et Ib ;
 - $\sigma'_v < 250kPa$ en zone de sismicité II ;
 - $\sigma'_v < 300kPa$ en zone de sismicité III.

b) Pour les sols argileux :

- critère Ar1 : $D_{15} > 5\mu$;
- critère Ar2 : $w_L < 35\%$;
- critère Ar 3 : $w > 0,9 \cdot w_L$;
- critère Ar 4 : Sol au-dessus de la droite « A » du diagramme de plasticité ¹.

¹ Dans le diagramme classique limite de liquidité w_L / indice de plasticité I_p , la droite dite " A " a pour équation : $I_p = 0,73(w_L - 20)$

Peuvent *a contrario* être considérés comme exempts de risque, les sols vérifiant :

- critère Ex1 : $D_{10} > 2mm$;
- ou ceux pour lesquels on a simultanément $\left\{ \begin{array}{l} \text{critère Ex11 : } D_{70} < 74\mu m \\ \text{critère Ex22 : } I_p > 10\% \end{array} \right.$

4.1.2. Susceptibilité quantitative à la liquéfaction

a) Résistance à la liquéfaction :

Les méthodes, basées sur des essais *in situ* (Seed *et al.*, 1983) ou de laboratoire évaluent quantitativement la susceptibilité à la liquéfaction en définissant **le taux de**

contrainte cyclique moyen nécessaire pour avoir la liquéfaction : $\left(\frac{\tau_L}{\sigma'_v} \right)_\ell$

Avec :

- τ_L , contrainte de cisaillement cyclique moyenne horizontale (résistance du sol) ;
- σ'_v , contrainte verticale effective.

Ce paramètre dépend à la fois d'une valeur mécanique *in situ*, permettant d'évaluer l'état initial de la compacité du sol, et de la magnitude du séisme considéré.

La valeur mécanique utilisée dans les travaux de Seed est le paramètre N (nombre de coups de mouton pour un enfoncement de 30 cm) du Standard Penetration Test (SPT). Les abaques de calculs à partir de l'essai SPT considèrent une énergie de battage de 60% de l'énergie théorique maximale (chute libre). On se ramène toujours à cette valeur, N_{60} , éventuellement en faisant un ratio à partir de l'énergie réelle.

En France, les essais les plus couramment pratiqués sont le pressiomètre et le pénétromètre statique. On se ramène alors à des valeurs du paramètre N par des corrélations usuelles (cf. Cassan – Essais *in situ* en mécanique des sols) :

	<u>Pressiomètre</u>	<u>Pénétromètre</u>
. argiles :	N = 15 à 20 x pl	N = 5 à 10 x q
. limons :	N = 30 x pl	N = 3,5 à 5 x q

- . argiles sableuses
ou sables argileux : $N = 20 \times pl$ $N = 2,5 \text{ à } 3,5 \times q$
- . sables : $N = 20 \times pl$ $N = 1,5 \text{ à } 3,5 \times q$

La valeur brute du paramètre N est ensuite corrigée du coefficient de normalisation C_N pour se ramener à une même contrainte verticale effective de 96 kPa.

La valeur N_1 obtenue est : $N_1 = C_N \times N$

avec $C_N = 1 - (1,25 \text{ Log } \sigma'_v)$ où σ'_v est en bars

Par ailleurs, selon la fraction fine des matériaux, il faut augmenter la valeur de N_1 , pour tenir compte des corrélations présentées par Seed pour ces sols.

Le taux de contrainte cyclique moyen nécessaire pour avoir la liquéfaction est alors obtenu grâce à l'abaque de Seed pour une magnitude et une valeur N_1 données (cf. Illustration 2).

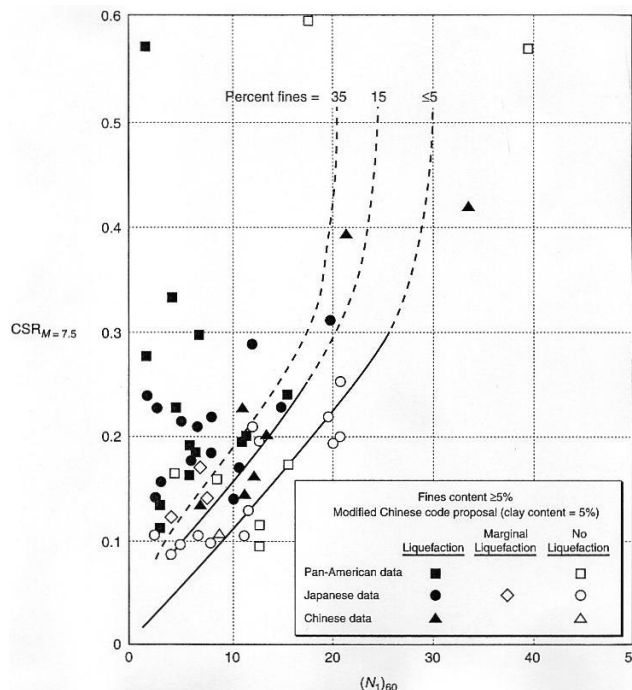


Illustration 2 – Abaque de Seed

b) Opportunité à la liquéfaction

L'évaluation du **taux de contrainte cyclique moyen induit par un séisme** peut être reliée à l'accélération maximale en surface par la relation (Seed *et al.*, 1983) :

$$\left(\frac{\tau_a}{\sigma'_v} \right)_S = 0,65 \times \frac{a_{\max}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \times rd$$

avec $rd = 1 - 0,015 \times z$, où z est la profondeur en mètres,

τ_a = contrainte de cisaillement cyclique induite par le séisme.

c) Coefficient de sécurité à la liquéfaction

Le rapport des taux de contraintes cycliques moyens définit le facteur de sécurité de la façon suivante :

$$FS_\ell = \left(\frac{\tau_L}{\sigma'_v} \right)_\ell / \left(\frac{\tau_a}{\sigma'_v} \right)_S$$

Pour que la liquéfaction soit peu probable, il est admis que FS_ℓ doit être supérieur à 1,33 conformément aux directives des PS 92 – norme NF P 06-013.

d) Potentialités de liquéfaction

Les potentialités de liquéfactions résultent de la conjonction du contexte hydrogéologique, de la susceptibilité qualitative et du coefficient de sécurité.

e) Intensité de la liquéfaction

Conformément au guide méthodologique pour la réalisation de microzonage sismique (AFPS), l'intensité de liquéfaction est définie par l'indice global de liquéfaction (Iwasaki & al., 1982) à partir du facteur F_L .

L'indice global de liquéfaction, I_L , permet d'évaluer l'impact de la profondeur et de l'épaisseur des horizons liquéfiables pour une colonne de sol :

$$I_L = \int_0^{20} (10 - 0,5z) F_L dz$$

où : $F_L = 0$ si matériaux non susceptibles qualitativement

$$F_L = 0 \quad \text{si } FS_\ell \geq 1$$

$$F_L = 1 - FS_\ell \quad \text{si } FS_\ell \leq 1$$

z profondeur (en m)

La valeur de I_L varie de 0 pour un site non liquéfiable à 100 pour un site très fortement liquéfiable. On distingue plusieurs classes :

- pas de liquéfaction : zones non liquéfiables ou $I_L = 0$;
- liquéfaction peu probable : $0 < I_L \leq 5$;
- liquéfaction probable : $5 < I_L \leq 15$;
- liquéfaction quasi certaine : $I_L > 15$.

4.2. APPRECIATION DES POTENTIALITES DE LIQUEFACTION DU SITE D'ETUDE

4.2.1. Formations à analyser

Sur les trois formations de base rencontrées sur le site d'étude, seule une a été examinée finement dans la mesure où sa susceptibilité à la liquéfaction ne peut être établie directement : les vases sablo-argileuses. Il convient de noter que ces vases se retrouvent fréquemment sur la cote mahoraise, et plus particulièrement elles ont été observées quelques centaines de mètres au Sud Ouest au droit du remblai côtier de Mtsapéré pour lequel nous disposons de plus de données d'études.

A l'opposé, deux horizons ont été immédiatement écartés vis à vis d'une possibilité de liquéfaction :

- les remblais qui, dans le cadre du projet, seront supposés correctement mis en œuvre selon les règles de l'art et donc non susceptibles à la liquéfaction ;
- les altérites volcaniques, qui de par leur nature même et leur origine, ne peuvent se liquéfier.

4.2.2. Contexte hydrogéologique

A défaut d'autre donnée plus précise, la nappe a été supposée à la cote +0,25 NGM, c'est-à-dire à la cote moyenne de marnage de la mer.

4.2.3. Susceptibilité qualitative à la liquéfaction

a) Granulométrie :

Outre les critères des règles PS 92, des fuseaux granulométriques délimitant le domaine de la plupart des sols liquéfiables sont disponibles dans la littérature (Faccioli & Resendiz 1976).

A défaut de disposer de données granulométriques obtenues dans les vases du site d'étude, nous avons repris les résultats acquis dans les vases au droit du remblai de Mtsapéré situé quelques centaines de mètres plus au Sud Ouest. Les rares granulométries disponibles dans les rapports d'archives exploités ont été faites dans des vases superficielles limono-sableuses (sondages C et D du rapport Géotechnique & Contrôles de Juin 96). Ces courbes ont été superposées aux fuseaux granulométriques délimitant le domaine de la plupart des sols liquéfiables (cf. Illustration 3).

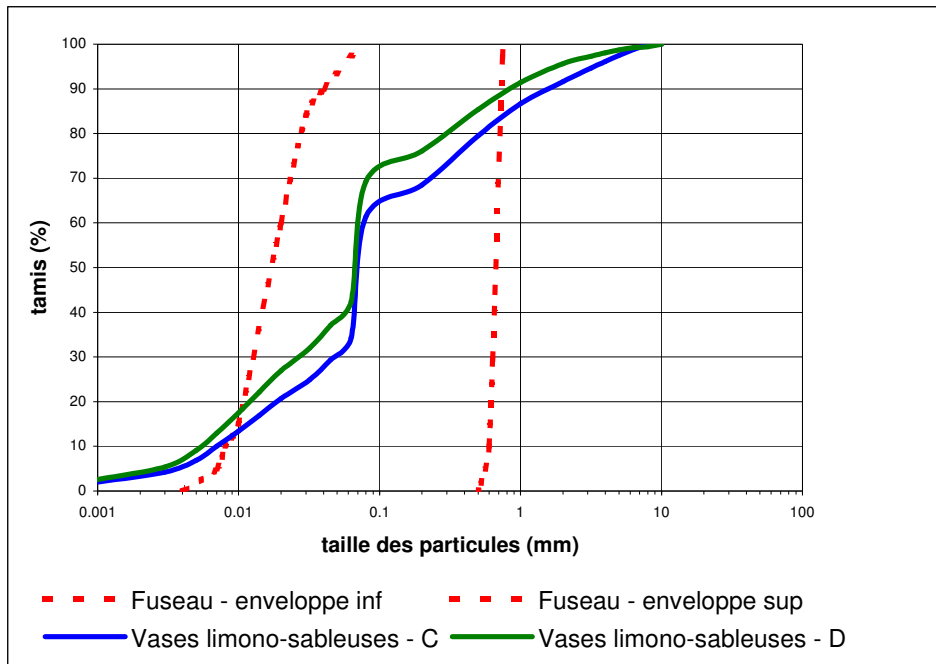


Illustration 3 - Courbes granulométriques des vases limono-sableuses de Mtsapéré

On constate donc que les vases limono-sableuses de Mtsapéré sortent légèrement du fuseau de susceptibilité à la liquéfaction :

- fraction fine légèrement trop élevée
- présence de sables grossiers et de graviers

b) Critères des PS 92 :

- *Données du site de Mtsapéré :*

Vis à vis des critères de suspicion et d'exclusion spécifiés dans les PS 92, le Tableau 1 récapitule les résultats obtenus. On notera qu'étant donnée la nature limono-sableuse (avec une fraction d'argile) des vases, ont été vérifiés à la fois les critères pour les sables et pour les argiles.

Nature	Critères de suspicion	vases limono-sableuses
Sables	S_r voisin de 100 %	Oui (sous nappe)
	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 15$	Oui ($C_u \approx 11$)
	$0,05 < D_{50} < 1,5mm$	Oui ($D_{50} = 0,07$ mm)
	$\sigma'_v < 200kPa$ en zones de sismicité la et lb ;	Oui
Argiles	$D_{15} > 5\mu$	Oui ($D_{15} = 8$ à $15 \mu m$)
	$w_L < 35\%$	Non ($w_L = 50$ à 57%)
	$w > 0,9 \cdot w_L$	Dépend du sondage
	Sol au-dessus de la droite « A » du diagramme de plasticité	Non
Nature	Critères d'exclusions	vases limono-sableuses
Sables	$D_{10} > 2mm$	Non ($D_{10} < 10 \mu m$)
Argiles	$\begin{cases} D_{70} < 74\mu m \\ I_p > 10\% \end{cases}$	$D_{70} = 80\mu m$ à $200 \mu m$ mais $I_p > 10 \%$

Tableau 1 – Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92) dans les vases de Mtsapéré

Au vu de ces résultats obtenus pour les vases de Mtsapéré la majorité des critères de suspicion sont vérifiés et les critères d'exclusion ne sont pas avérés. Cela signifie que cet horizon semble plutôt liquéfiable.

- *Données du site de la station d'épuration :*

Seules quelques données sont disponibles, ce qui rend l'analyse assez peu exploitable.

Nature	Critères de suspicion	Vases sablo argileuses
Argiles	$D_{15} > 5\mu$	Non vérifiable
	$w_L < 35\%$	Non ($w_L = 59\%$)
	$w > 0,9 \cdot w_L$	Oui ($w = 128\% w_L$)
	Sol au-dessus de la droite « A » du diagramme de plasticité	Non
Nature	Critères d'exclusions	Vases sablo argileuses
Argiles	$\left\{ \begin{array}{l} D_{70} < 74\mu m \\ I_p > 10\% \end{array} \right.$	Non $D_{50} = 80\mu m$
		Oui IP = 22 %

Tableau 2 – Examen des critères de susceptibilité qualitative (règles PS 92) dans les vases du projet d'extension de station d'épuration

Ces résultats ne permettent pas de clairement trancher : un critère de suspicion du 3 exploitable est positif, les critères d'exclusion ne sont pas tous vérifiés.

En conséquence, ne pouvant totalement exclure tout potentiel de liquéfaction dans les vases sablo-argileuses présentes au droit du projet d'extension de la station d'épuration, et dans la mesure où sur le littoral de Mtsapéré ces mêmes vases semblent plutôt liquéfiables, **il a été considéré que les vases littorales sont potentiellement liquéfiables.**

4.2.4. Susceptibilité quantitative et opportunité à la liquéfaction

a) Hypothèses

Sur la base des données disponibles, la colonne de sol présentée dans le Tableau 3 a été retenue pour le calcul.

Faute d'étude d'aléa sismique spécifique, les valeurs issues de l'étude du remblai de Mtsapéré ont été reprises :

- la magnitude du séisme de référence est de 5,2 ;
- l'accélération maximale est de 2,2 m/s².

On soulignera que ces hypothèses sismiques sont purement indicatives et ne peuvent être reprises vis-à-vis de la réalisation des ouvrages projetés.

Formation	Epaisseur (m)	Cote (NGM)	pl (MPa)	γ (kN/m ³)
Remblai (non liquéfiable)	2,5 m	+ 4 à +1,5 NGM	Sans objet	19 kN/m ³
Vases	2,5 m	+ 1,5 à -1,0 NGM	0,1 MPa	16 kN/m ³
Substratum altéré (non liquéfiables)	> 15 m	- 1 à -20 NGM	Sans objet	

Tableau 3 – Paramètres retenus pour le calcul de liquéfaction

b) Coefficient de sécurité, potentialités et intensité de la liquéfaction

Le Tableau 4ci-après donne le détail du calcul de liquéfaction pratiqué. Les calculs ont été réalisés en exploitant l'abaque de Seed pour des sables présentant une teneur en fines de l'ordre de 15 %. On rappellera qu'il s'agit d'un calcul purement indicatif dans la mesure où aucune étude d'aléa sismique n'a été pratiquée sur le site concerné.

Il ressort du calcul que le facteur de sécurité calculé dans les vases est très médiocre car inférieur à FS = 0,5. Si l'on applique scrupuleusement les PS92 (norme NF P 06-013), pour un facteur de sécurité FS < 1,33, il convient de procéder à un traitement du sol potentiellement liquéfiable ou à un renforcement des ouvrages.

EXTENSION STATION D'EPURATION DE MAMOUDZOU

Position de la nappe : z = 3.75 m

Profondeur (m)		Horizon	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	σ_v (kPa)	σ'_v (kPa)	calcul de $(\tau/\sigma')_{vs}$			calcul de $(\tau/\sigma')_l$						Facteur de sécurité FS _l	Intensité liquéfaction		
ht et bas	moy.						a_{max} (m/s ²)	r_d	$(\tau/\sigma')_{vs}$	pl (MPa)	$N_{\text{éq.}}$	C_N	N_1	$(\tau/\sigma')_l$ (brut)	$(\tau/\sigma')_l$ (corrigé)		F _L	I _{Li}	I _L
0 - 2,5 m	1.25	Remblai	19	11	47.5	47.5	2.2	0.9988	0.1428							> 2	0.0000	0.0000	4.2
2,5 - 5 m	3.75	Sables coralliens	16	6	67.5	67.5	2.2	0.9895	0.1415	0.1	2	1.2134	2	0.045	0.068	0.477	0.5229	4.2489	

Tableau 4 – Calcul de l'intensité de liquéfaction

Si l'on poursuit l'analyse en évaluant l'intensité de liquéfaction (témoignant des effets du phénomène en surface), la valeur obtenue est $I_L = 4,2$ c'est-à-dire inférieure à 5. Pour ces gammes de valeurs, l'AFPS (Association Française Para Sismique) considère que la zone relève d'une liquéfaction "peu probable", en tout cas que les effets en surface seront modérés.

c) **Risques de liquéfaction**

Les résultats énoncés ci-avant signifient (dans la limite de représentativité des données disponibles) :

- la liquéfaction est possible sur le site de projet. En effet, conformément aux PS92 – norme NF P 06-013, le constat de facteur de sécurité calculé nettement inférieur à 1,33 conduit à prendre en considération le risque de liquéfaction. Dans ce cadre, l'application stricte de la norme devrait conduire à engager un traitement de l'horizon potentiellement liquéfiable ou un renforcement des fondations d'ouvrages ;
- si la zone liquéfiée effectivement, l'incidence en surface devrait rester modérée. En effet la couche potentiellement liquéfiable est d'épaisseur limitée et la sollicitation sismique assez faible. Il convient de noter que les ouvrages fondés directement au-delà des vases sableuses ne pourront être affectés par la liquéfaction (sauf ouvrages éventuellement fondés sur micropieux), seules les constructions superficielles étant exposées aux effets de la liquéfaction.

4.2.5. **Préconisations en terme de dispositions constructives**

Si les sables coralliens se révèlent liquéfiables, sachant que le risque de liquéfaction ne peut être négligé au vu de la norme NP P 06-013, mais que ses effets seront limités (intensité de liquéfaction faible), nous recommandons d'adopter des dispositions constructives légères :

- sous le niveau de l'eau, remblayer avec un matériau graveleux noble adapté aux remblaiements hydrauliques sans compactage (matériau grossier propre à granulométrie étalée – cf. règles de l'art en la matière) ;
- au dessus du niveau de l'eau, soigneusement compacter les matériaux avec des moyens lourds afin de d'attendre au minimum 90 % de l'OPM sur le premier mètre de sol en place et sur toute l'épaisseur remblayée, et purger les terrains superficiels très médiocres qui auraient été reconnus pour les substituer par du matériau noble compacté ;
- pour les constructions lourdes ou vulnérables aux mouvements (ex : bassins de la station), privilégier des fondations descendues dans le substratum altéré ;

- fonder les bâtiments plus légers sur semelles filantes avec vide sanitaire, voire sur radier généralisé armé. Les fondations seront arrêtées dans du remblai, et en aucun cas dans les vases (au moins 3 fois la largeur de la semelle entre sa base et le toit des vases). Les solutions consistant à fonder les bâtiments sur dallage à même le sol ou sur semelles ponctuelles sont à proscrire ;
- systématiquement réaliser un chaînage par armatures horizontales et verticales des voiles, y compris dans les murs en agglos afin de renforcer le monolithisme du bâti. A priori, l'application des règles classiques de génie parasismique suffiront à cet effet ;
- de mettre des joints souples sur les réseaux au niveau des limites des bâtiments et au niveau des joints de rupture des structures ;
- latéralement, la zone remblayée devra être protégée de la mer par un ouvrage de protection. Cet ouvrage devra être dimensionné sous action sismique, en réduisant significativement la résistance au cisaillement des vases susceptibles de se liquéfier.

Bien évidemment, ces recommandations ne doivent pas conduire à écarter les normes, règlements et règles de l'art en vigueur en ce qui concerne la construction, mais ne peuvent que les renforcer.

5. Conclusions

La susceptibilité et les potentialités de liquéfaction des sols au droit du projet d'extension de la station d'épuration de Mamoudzou ont été examinées. Il convient de souligner que cette étude est basée sur des données partielles dont la finalité n'était pas l'étude de la liquéfaction sur le site :

- étude géotechnique de la première phase de la station d'épuration ;
- étude géotechnique de réalisation du remblai côtier de Mtsapéré (quelques centaines de mètres plus au Sud Ouest).

Seules les vases sablo-argileuses présentes sur le site de projet ont été considérées comme potentiellement liquéfiables.

Conformément aux règles PS 92 – norme NF P 06-013 – les vases du site peuvent liquéfier, ce qui réglementairement doit conduire soit à un traitement de l'horizon vulnérable soit à un renforcement des fondations. Toutefois, les calculs d'intensité de liquéfaction montrent qu'en cas d'occurrence du séisme de référence (hypothèse purement indicative issue de l'étude de Mtsapéré et ne pouvant être utilisée pour la construction des ouvrages), les effets en surface de la liquéfaction devraient rester modérés.

Par conséquent, nous recommandons d'adopter des dispositions constructives légères au droit du site de projet, ces dispositions étant énoncées au chapitre 4.2.5.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Océan Indien
Antenne de Mayotte
9, centre Amatoula – Z.I. de Kaweni – BP. 1398
97600 MAMOUDZOU
Tél. : 02.69.61.28.13