



Soyez les bienvenues

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de génie de la construction

Département de génie civil

MÉMOIRE DE MASTER 2

**EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER 2 ACADÉMIQUE
EN GÉNIE CIVIL, OPTION GÉOTECHNIQUE ET ENVIRONNEMENT**

Thème

**Analyse du comportement des sols de la zone
portuaire de Bejaia soumis à la sollicitation
sismique : cas du phénomène de liquéfaction.**

Encadré par : M^r BAHAR Ramdane

Présenté par:
M^r: MAKOUDI Mallek



1) Partie bibliographique : consistant en une synthèse générale sur le phénomène de liquéfaction des sols et des méthodes empirique d'évaluation du potentielle de liquéfaction des sols

2) Partie expérimentale : consistant en une évaluation du potentiel de liquéfaction du site de Bejaia d'abord par la méthode empirique de Seed et Idriss ensuite par l'analyse numérique en utilisant le logiciel FLAC 2D V6.0

Introduction générale

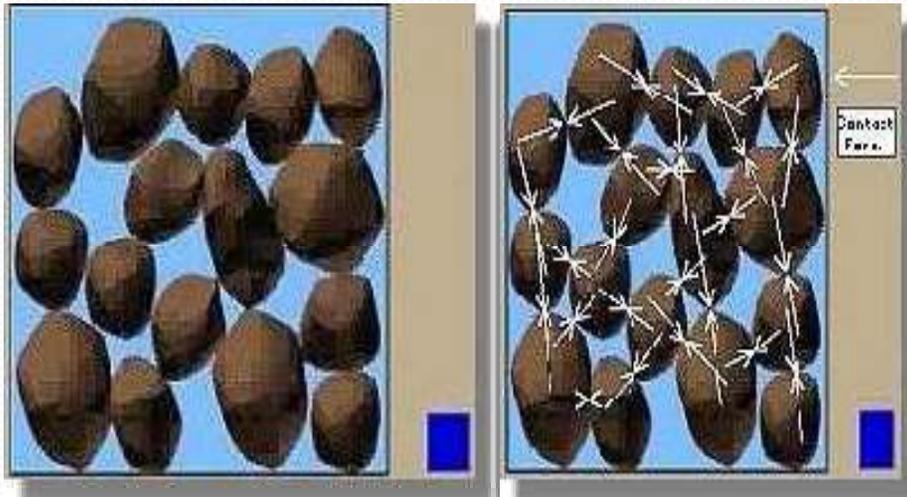
Les tremblements de terre sont de loin les catastrophes naturelles les plus meurtrières au monde. Suite à cet aléa, les sols saturés en eau peuvent se liquéfier, causant de part, des dégâts sur les ouvrages et les constructions du point de vue économie et d'autre part la mort d'Hommes du point de vue perte humaine

Chapitre 1 présentation du phénomène de liquéfaction

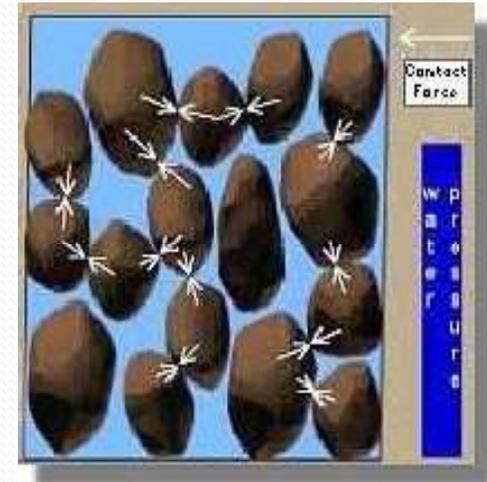
La liquéfaction est un phénomène qui se produit sous sollicitation sismique, éventuellement dans des sols sableux, saturés, en condition non drainé. Ce phénomène est lié à la conjonction simultanée des trois paramètres suivants :

- Présence d'un matériau pulvérulent ;
- Présence d'une nappe d'eau ;
- Existence d'une sollicitation.

Phénomène physique



Etat initial



Etat de la liquéfaction

Ce phénomène peut être traduit par la formule suivante :

- Augmentation de la pression interstitielle
- Diminution de la contrainte effective

$$\sigma' = \sigma - \Delta U$$

The equation shows a blue σ' with a red arrow pointing down, a blue σ , a red minus sign, a red ΔU with a red arrow pointing up.

Exemples de dégâts



Rupture de pont, due à l'épandage latéral dans le sol

Les facteurs influençant la liquéfaction

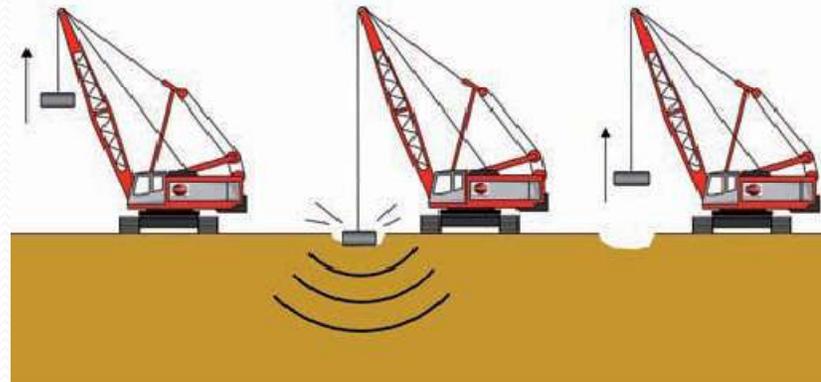
Plusieurs paramètres peuvent influencer sur la liquéfaction des sols dont on a :

- 1. La distribution granulométrique**
- 2. La densité relative**
- 3. La saturation**
- 4. La structure du sol**
- 5. La présence de fines**
- 6. La profondeur de la nappe phréatique**
- 7. L'état de contrainte actuel**
- 8. Influence de l'histoire des contraintes et déformations**
- 9. L'incrément de contrainte appliqué**
- 10. L'âge du dépôt**

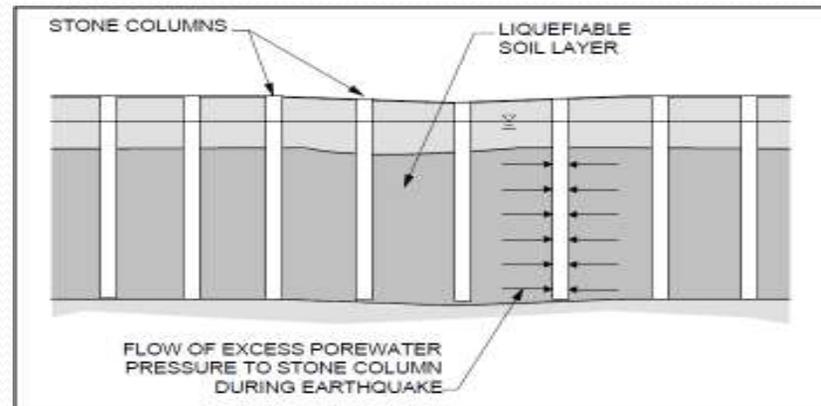
Techniques de traitement des sols liquéfiables

Pour améliorer la résistance à la liquéfaction d'un sol liquéfiable on doit soit :

- I. Le densifier
- II. Le compacter
- III. Le drainer
- IV. Le confiner



Compactage dynamique



Système de drainage



Conclusion partielle

Vu toutes les conséquences et les dégâts qu'engendre le problème de liquéfaction des sols, il est donc très important d'adopter des techniques d'évaluation du risque de liquéfaction des sols, C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2: Evaluation du potentiel de liquéfaction

L'évaluation du risque de liquéfaction sous séisme est un enjeu important, car les dégâts occasionnés aux ouvrages sont souvent catastrophiques et provoquent parfois la mort d'hommes. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer ces risques de manière fiable.

La démarche d'analyse de la liquéfaction d'un site se fait habituellement en deux étapes :

1. Identification du caractère potentiellement liquéfiable des sols sur la base de simples paramètres d'identification.
2. Evaluation du potentiel de liquéfaction du site par les méthodes empiriques.

1. Identification des sols potentiellement liquéfiables

Les sols considérés à priori comme suspects à la liquéfaction selon la norme NF P06-013 sont :

a) Sables vasards et silts présentant les caractéristiques suivantes :

- Degré de saturation S_r voisin de 100%
- Granulométrie uniforme avec un coefficient d'uniformité $C_u = D_{60}/D_{10} < 15$
- Diamètre à 50%, tel que $50 < D_{50} < 1500 \mu\text{m}$

b) Sols argileux présentant les caractéristiques suivantes

- Sol saturé
- Diamètre à 15%, D_{15} supérieur à 0.005 mm
- Limite de liquidité, W_L , inférieure à 35%
- Teneur en eau supérieure à $0.9 W_L$.

2. Evaluation du potentiel de liquéfaction du site par les méthodes empiriques

Beaucoup de méthodes empiriques évaluant le potentiel de liquéfaction ont été données par plusieurs chercheurs dont on peut citer :

- La méthode de Seed et Idriss
- La méthode de Roberston
- Méthode d'Andrus et Stokoe
- Méthode de Dobry
- Méthode de Sasaki et Koga

Toutes ces méthodes sont basées sur l'approche en contraintes totales pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction. Cette approche nécessite la détermination de la contrainte de cisaillement développée par la sollicitation sismique (*CSR*) et de la résistance au cisaillement cyclique non drainée (*CRR*).

Le rapport des deux paramètres (CRR/CSR) permet la définition d'un **Fs** vis à vis du risque de liquéfaction qui nous permet d'évaluer le potentiel de liquéfaction d'un site.

$$F_s = CRR/CSR$$

$$CSR = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} \right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) r_d$$

$$CRR = \left(\frac{\tau_l}{\sigma'_{v0}} \right)$$

D'après le RPA 99, les sols sont réputés liquéfiables lorsque le rapport (CRR/CSR) est inférieur à 1,25.

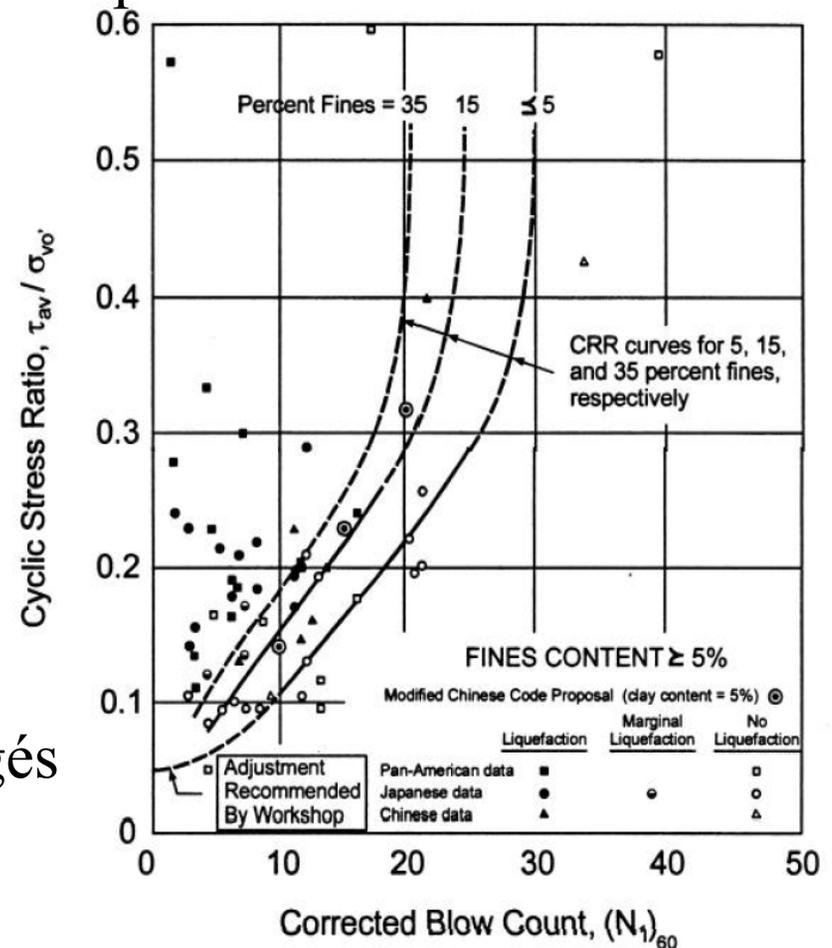
Exposition de la méthode de Seed et Idriss

1) Evaluation par l'essai SPT

Seed en 1979, a développé une méthode reposant sur les résultats acquis au SPT sur plusieurs sites où la liquéfaction est apparue.

Le critère de liquéfaction est en fonction de sa teneur en fines FC, de sa résistance au SPT $(N_1)_{60}$ et de l'intensité de la sollicitation sismique

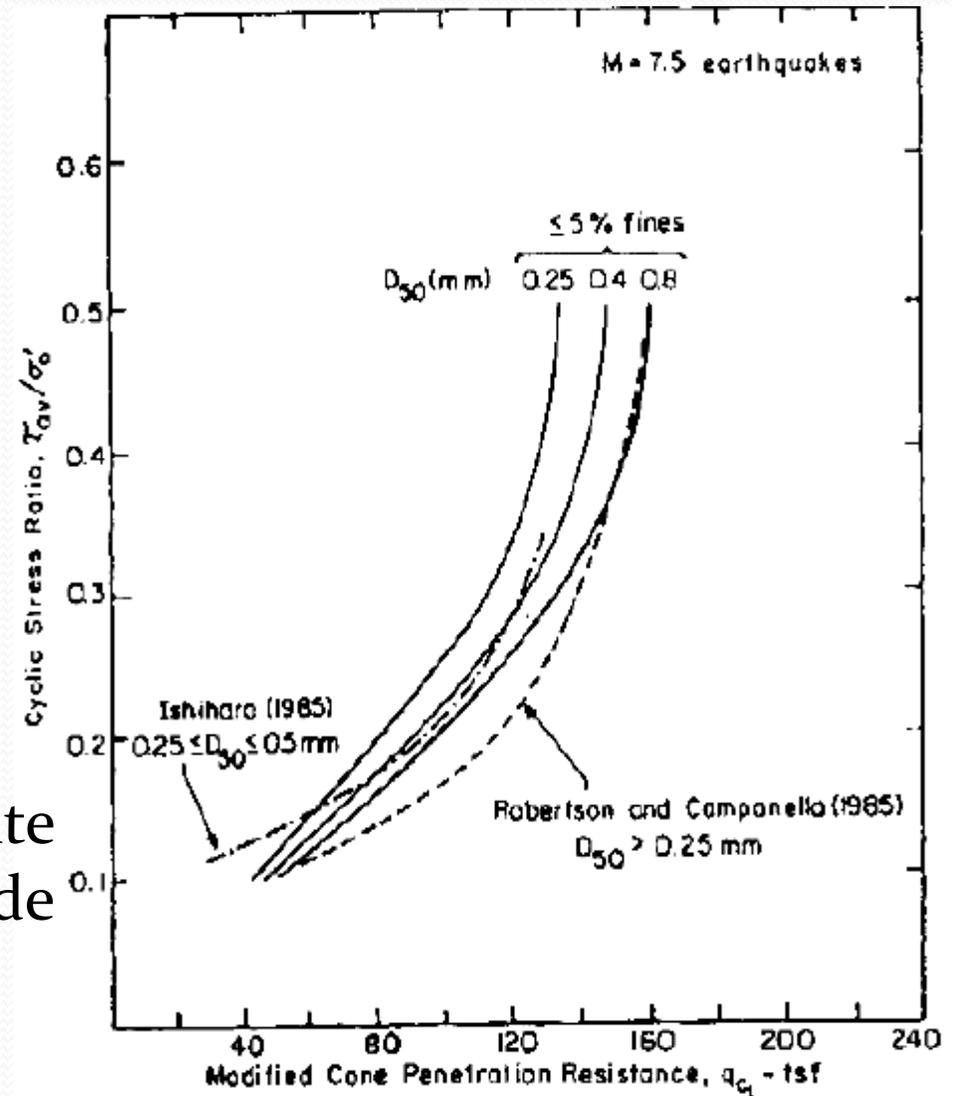
$(N_1)_{60}$: le nombre de coups SPT corrigés



2) Evaluation par l'essai CPT

Dans cet essai le critère de liquéfaction est en fonction de la teneur en fines FC, de la résistance de pointe q_{c1} du CPT et de l'intensité de la sollicitation sismique

q_{c1} : Résistance de pointe normalisée selon les conditions de sites



Conclusion partielle

L'essai de pénétration standard (SPT), reste encore la référence pour l'évaluation du risque de liquéfaction des sols. Le problème de cette méthode réside dans le fait que l'outil d'investigation est très peu précis, par conséquent ces résultats sont peu précis aussi.

Le CPT paraît être mieux convenu à évaluer le potentiel de liquéfaction que le SPT parce qu'il est plus standardisé, reproductible, rentable et le plus important, il nous donne un profil de la pénétration du sol continu avec la profondeur

Chapitre 3

application expérimentale

Après l'étude théorique des méthodes d'évaluation du potentiel de liquéfaction dans le chapitre 2, le chapitre 3 sera consacré en une application expérimentale sur le site de Bejaia en utilisant la méthode d'évaluation du potentiel de liquéfaction de Seed et Idriss basée sur les résultats requis des deux essais SPT et CPT

Chapitre 3 application expérimentale

Situation du site d'étude

Bejaia, est une ville algérienne située à l'est d'Alger, elle connue pour son grand pole industriel et son port pétrolier et commercial comportant de grands ouvrages. La ville de Bejaia est montrée sur la photo suivante



Vue aérienne de la ville de Bejaia

Sismicité de la ville de Bejaia

Dans le passé, plusieurs séismes avaient fortement ébranlés la région de Bejaia, comme celui de Bénie Maouche et de Béni Ourtillane (novembre 2000), qui ont provoqués des pertes humaines et des désordres importants sur les maisons. Cependant, l'une des conditions de manifestation de la liquéfaction, existe déjà sur ce site.

D'après le document technique réglementaire DTR BC 2-48 des règles parasismiques algériennes RPA 99, révisées en 2003, la commune de Bejaia est classée en zone IIa, sismicité moyenne.

Les sites d'étude

I . Les sols des Bacs de pétrole du terminal marin de Bejaia

➤ R21

➤ R13

II . Les sols du projet : SEA LINE BEJAIA

➤ Station de pompage

➤ Station de comptage

Les bacs de pétrole

Résultats au CPT

Bac R21

les valeurs des coefficients de sécurité obtenues par le CPT dans le bac R21 en fonction de la profondeur, figurent dans ce tableau

Les calculs sont fait pour une magnitude de 7.5 et 5.8

Prof (m)	M=7.50		M=5.80	
	Fs (0.2g)	Fs (0.3g)	Fs (0.2g)	Fs (0.3g)
1	1.874	1.250	3.618	2.412
2	1.665	1.110	3.215	2.143
3	1.181	0.788	2.280	1.520
4	1.097	0.731	2.118	1.412
5	1.403	0.936	2.709	1.806
6	1.527	1.018	2.947	1.965
7	1.487	0.991	2.871	1.914
8	1.348	0.899	2.602	1.735
9	1.165	0.776	2.248	1.499
10	1.697	1.131	3.275	2.184
11	0.933	0.622	1.800	1.200
12	0.907	0.605	1.750	1.167
13	1.054	0.703	2.034	1.356
14	1.348	0.899	2.603	1.735
15	1.650	1.100	3.185	2.123
16	1.902	1.268	3.671	2.447
17	1.244	0.829	2.400	1.600
18	1.110	0.740	2.143	1.429
19	1.004	0.670	1.939	1.292
20	0.989	0.659	1.909	1.273

Les bacs de pétrole

Résultats au CPT

BacR13

Les valeurs des coefficients de sécurité obtenues par l'essai CPT dans le bac R13 en fonction de la profondeur sont donnés dans ce tableau

A certaine profondeur la liquéfaction est observée avec des Fs inférieurs à 1 Pour une magnitude de 7.5

Prof (m)	M=7.50		M=5.80	
	Fs (0.2g)	Fs (0.3g)	Fs (0.2g)	Fs (0.3g)
1	1.601	1.067	3.090	2.060
2	1.467	0.978	2.832	1.888
3	1.292	0.861	2.494	1.663
4	1.529	1.020	2.952	1.968
5	1.590	1.060	3.070	2.047
6	1.257	0.838	2.427	1.618
7	1.166	0.778	2.252	1.501
8	1.491	0.994	2.879	1.919
9	1.335	0.890	2.577	1.718
10	1.046	0.698	2.020	1.347
11	1.244	0.829	2.401	1.600
12	1.304	0.869	2.516	1.677
13	1.282	0.854	2.474	1.649
14	1.377	0.918	2.658	1.772
15	1.361	0.907	2.626	1.751
16	1.024	0.683	1.977	1.318
17	1.214	0.809	2.343	1.562
18	1.410	0.940	2.722	1.815
19	1.370	0.913	2.644	1.762
20	1.298	0.865	2.506	1.670



Discussion des résultats

Les coefficients de sécurité obtenues par les deux essais SPT et CPT sont supérieurs à $5/4$, mais cela ne justifie pas l'absence du risque de liquéfaction puisqu'à certaines profondeurs des couches de sable, F_s est inférieur à $5/4$. Bien sur la liquéfaction d'une couche de sable entrainera des désordres dans les couches supérieurs, même si celles-ci ne se liquéfie pas

Le Projet : SEA LINE BEJAIA

Résultats au SPT

Station de pompage

Le tableau suivant présente les valeurs des coefficients de sécurité obtenus à partir de l'essai SPT dans la station de pompage en fonction de la profondeur

Sondage	Prof (m)	M=7.50		M=5.80	
		Fs (0.2g)	Fs (0.3g)	Fs (0.2g)	Fs (0.3g)
SPT 5	1.5	1.593	1.062	3.074	2.049
	2.9	1.128	0.752	2.177	1.451
	4.5	0.869	0.579	1.677	1.118
	6.1	0.857	0.572	1.655	1.103
	8.9	0.602	0.401	1.162	0.775
SPT 6	1.5	1.885	1.256	3.638	2.425
	3	1.011	0.674	1.951	1.301
	4.5	0.869	0.579	1.677	1.118
	6.6	2.032	1.355	3.922	2.615
	9.2	2.339	1.559	4.515	3.010
	12.2	0.997	0.664	1.924	1.282
	15.4	0.975	0.650	1.882	1.255

Projet SEA LINE BEJAIA

Résultats au CPT

Station de comptage

Le tableau suivant présente les valeurs des coefficients de sécurité obtenus par l'essai CPT dans la station de comptage en fonction de la profondeur

Prof (m)	M=7.50		M=5.80	
	Fs (0.2g)	Fs (0.3g)	Fs (0.2g)	Fs (0.3g)
1	1.125	0.750	2.171	1.447
2	0.916	0.611	1.768	1.179
3	1.199	0.799	2.314	1.543
4	1.375	0.917	2.654	1.769
5	0.820	0.547	1.583	1.055
6	0.695	0.463	1.341	0.894
7	1.389	0.926	2.681	1.787
8	0.721	0.481	1.392	0.928
9	0.726	0.484	1.402	0.935
10	0.953	0.635	1.839	1.226
11	1.186	0.791	2.289	1.526
12	1.026	0.684	1.980	1.320
13	1.293	0.862	2.496	1.664
14	0.978	0.652	1.888	1.258
15	0.993	0.662	1.917	1.278

Discussion des résultats

Les valeurs des coefficients de sécurité obtenues par les deux méthodes SPT et CPT sont inférieures à $5/4$ ce qui nous montre bien, que ces sols sont potentiellement liquéfiables

Résumé

Le calcul expérimental par les deux méthodes SPT et CPT, ont montré que les sols du site de Bejaia sont potentiellement liquéfiables comme indiqué sur le tableau

bac R21	Sol liquéfiable
Bac R13	Sol liquéfiable
Station de pompage	Sol liquéfiable
Station de comptage	Sol liquéfiable

Observations obtenus par la méthode de Seed et Idriss



Conclusion partielle

La complexité du comportement exprimé par les sols liquéfiables et l'insuffisance des méthodes empiriques évaluant leur risque de liquéfaction, il est nécessaire d'utiliser et de développer des méthodes numériques pour l'évaluation de la liquéfaction, c'est l'objet du dernier chapitre

Le dernier chapitre de ce projet est consacré à la modélisation numérique du potentiel de liquéfaction du site de Bejaia par le logiciel de calcul FLAC 2D V6.0. le modèle utilisé est le model de Ramberg-Osgood, qui est introduit dans FLAC.

Comme dans le calcul expérimentale, Cette analyse concerne :

- I. Les bacs de pétrole du terminal marin R21 et R13
- II. La station de pompage et la station de comptage

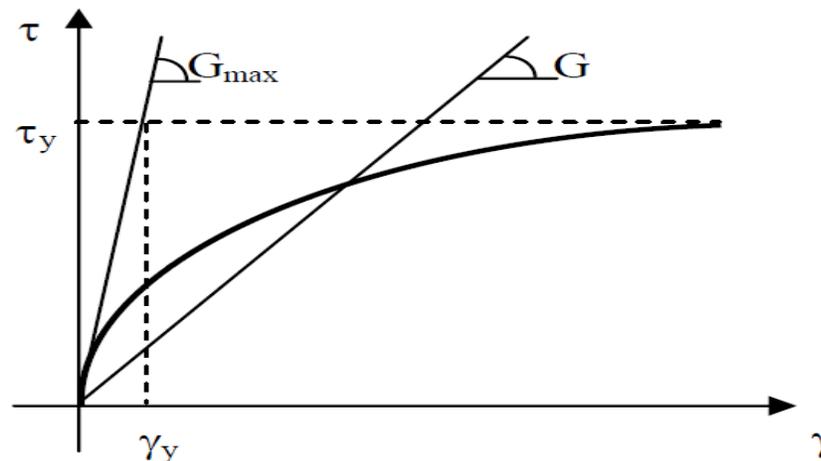
Présentation du modèle non linéaire de Ramberg-Osgood

La formulation d'hystérésis de Ramberg-Osgood entre contrainte de cisaillement et distorsion permet de simuler la non-linéarité même dans le domaine élastique des matériaux.

La formule classique de Ramberg-Osgood s'écrit

$$\gamma - \gamma_c = \frac{1}{G_{max}} \left[1 + \alpha \left(\frac{|\tau - \tau_c|}{n \tau_y} \right)^{r-1} \right] (\tau - \tau_c)$$

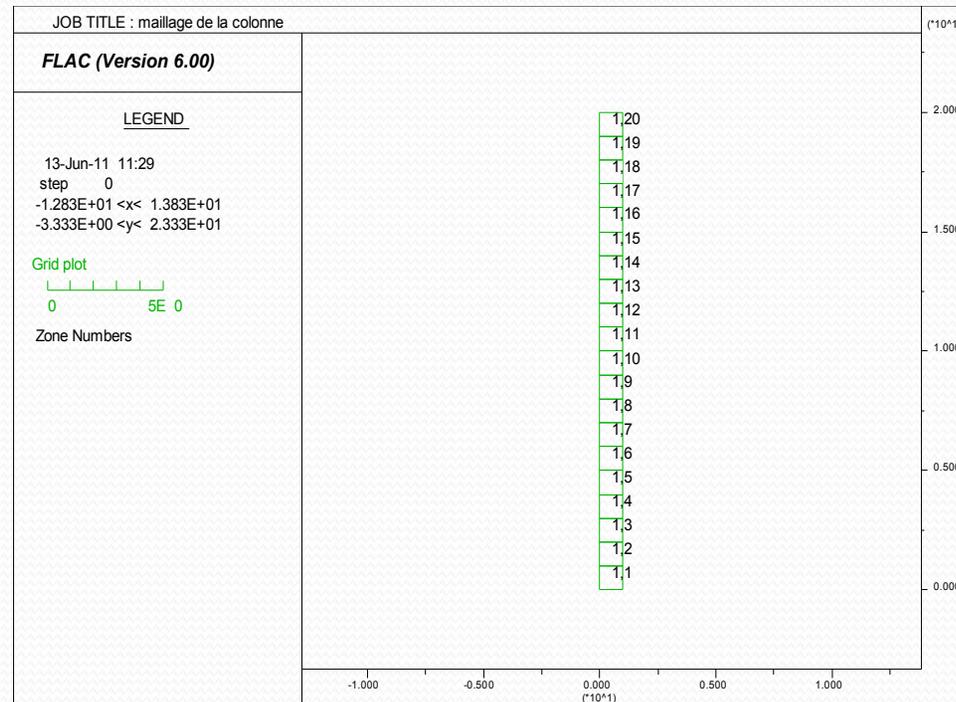
Le module de cisaillement varie en fonction de la contrainte et de la position dans le cycle et donc de la distorsion, comme l'introduit la courbe ci-dessous:



non linéarité du module de cisaillement sécant

Maillage

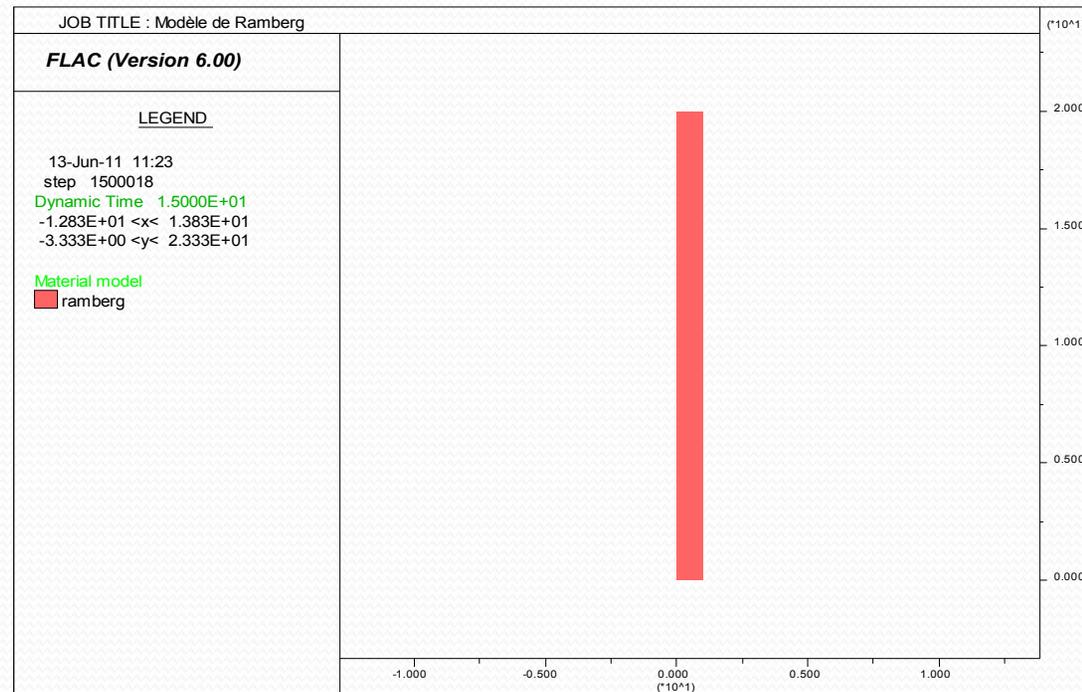
Pour le maillage on a opté pour une modélisation du profil de sol, sous forme d'une colonne discrétisée en 20 éléments rectangulaires d'un mètre d'épaisseur et de largeur ,comme indiqué sur la figure.



Le maillage adopté pour la collnne

Modèle de comportement et propriétés du sol

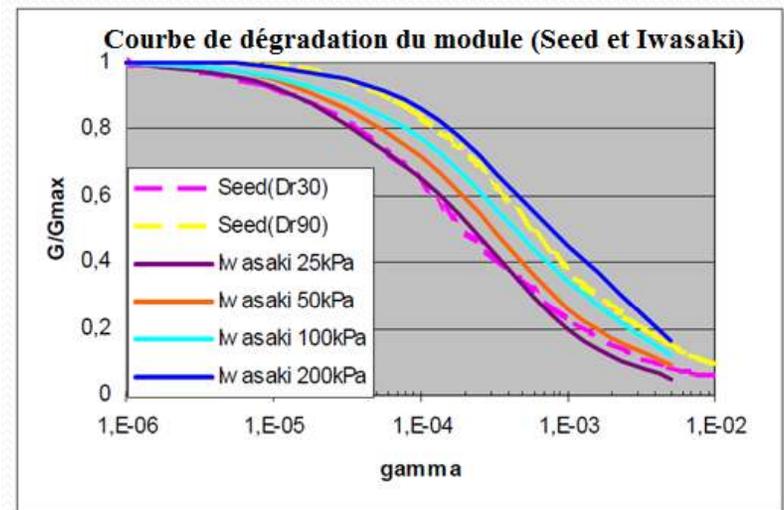
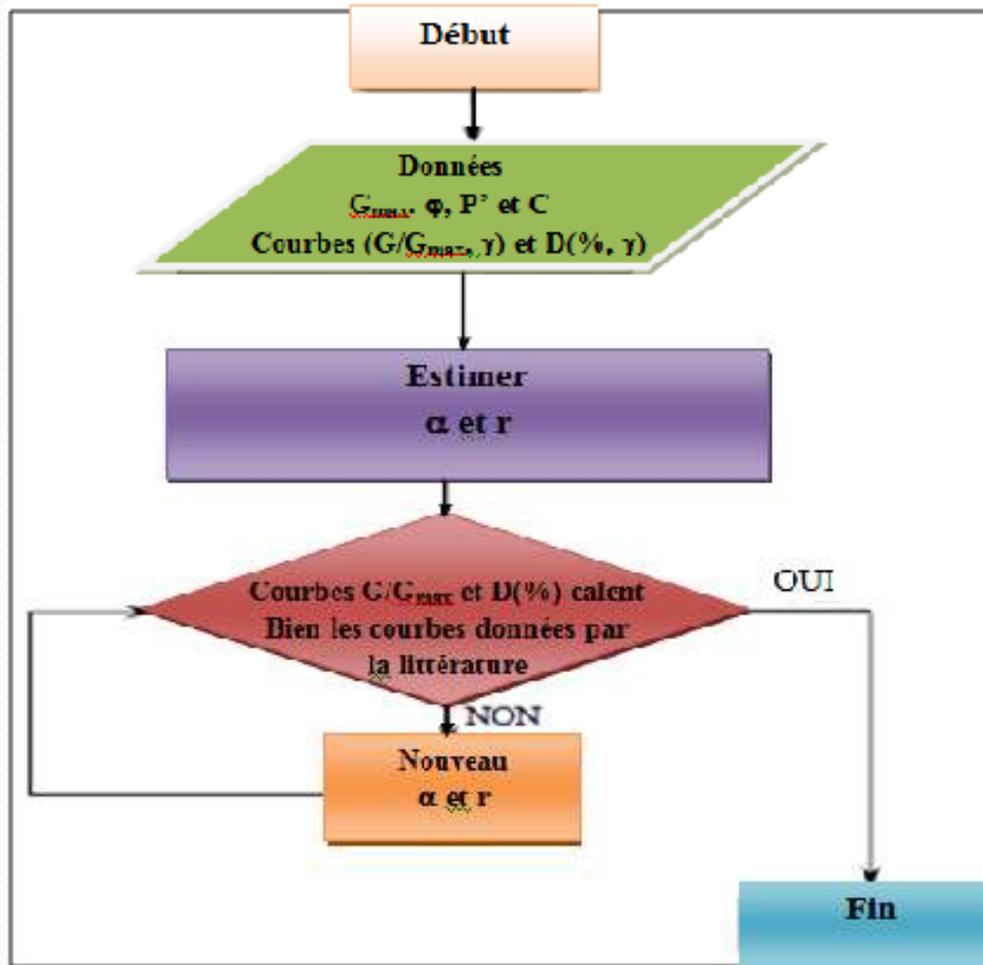
Dans notre analyse numérique, nous avons opté pour le modèle élastique non linéaire de Ramberg-Osgood qui se trouve sur un fichier d'extension « **Fis** » au quel nous faisons appel. Les propriétés du sol étudié se trouvent sur un fichier de données d'extension « **.Dat** ». Le modèle est montré sur figure suivante



modèle du comportement « Ramberg-Osgood »

Le calage des paramètres de Ramberg-Osgood r et α

Le calage des paramètres r et α de la loi de déformabilité déviatoire type Ramberg-Osgood, est fait à l'aide d'une procédure pratique développée avec Excel. La procédure suit l'organigramme montré sur la figure





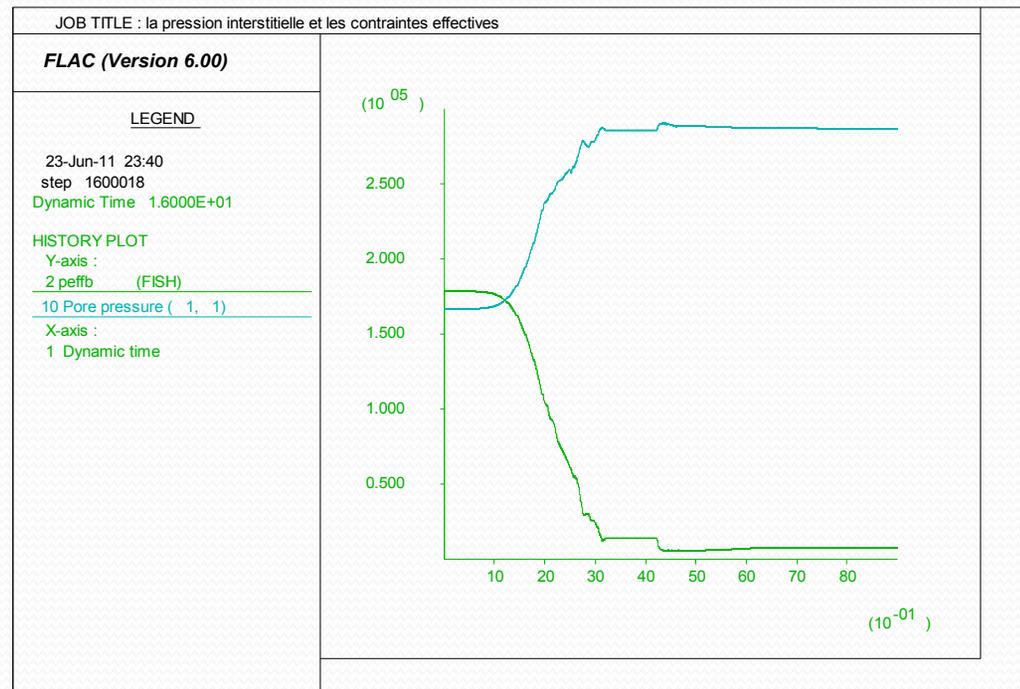
Les valeurs de r et α obtenues à partir de la procédure de calage sont montrées dans le tableau suivant

Site	sondage	r	α
Les bacs de pétrole du terminal marin	R21 (S 01)	2.3	250
	R13 (S 03)	2.3	330
(PROJET SEA LINE BEJAIA)	Station de pompage (S 06)	2.3	240
	Station de comptage (S 09)	2.3	180

Résultats de l'analyse numérique

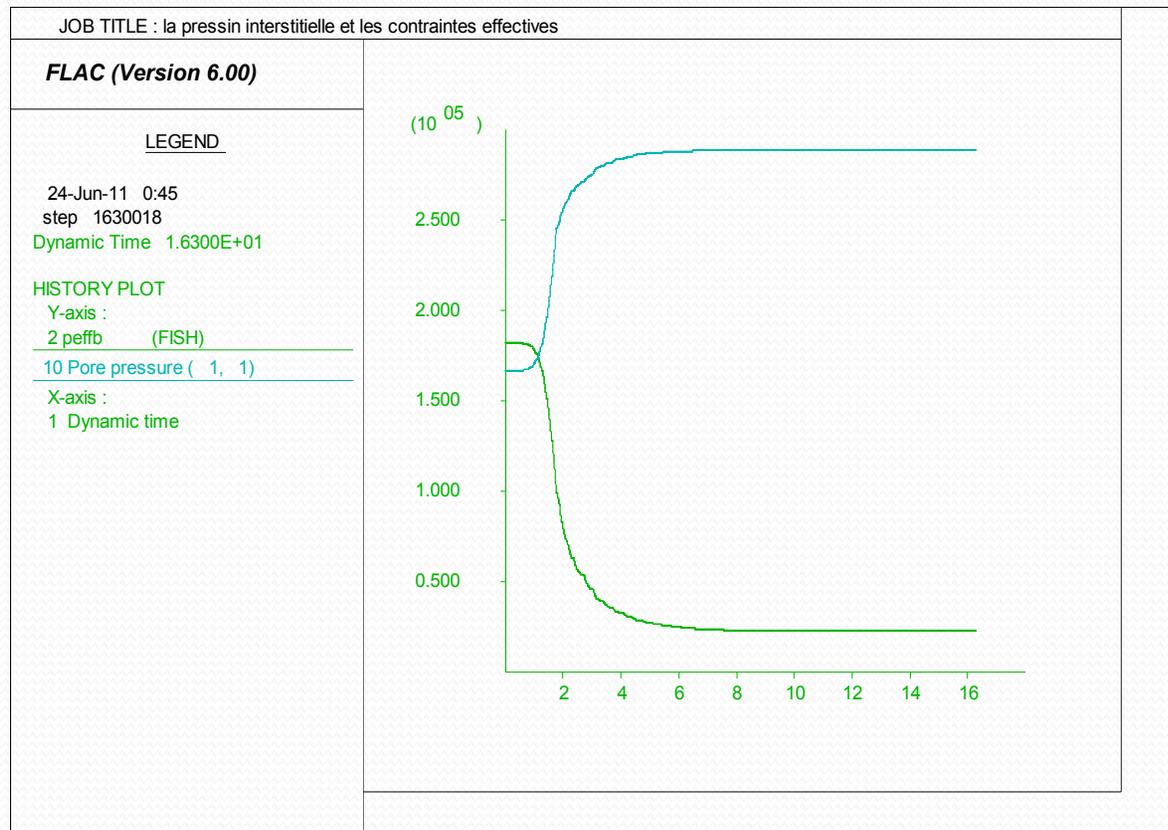
Les résultats d'analyse numérique par FLAC, sont donnés sous forme de courbes d'évolution de la pression interstitielle et des contraintes effectives

La figure ci-dessous montre que les contraintes effectives s'annulent après 3 seconde du début de chargement et la liquéfaction se déclenche en ce moment



Sol situé sous le Bac R21

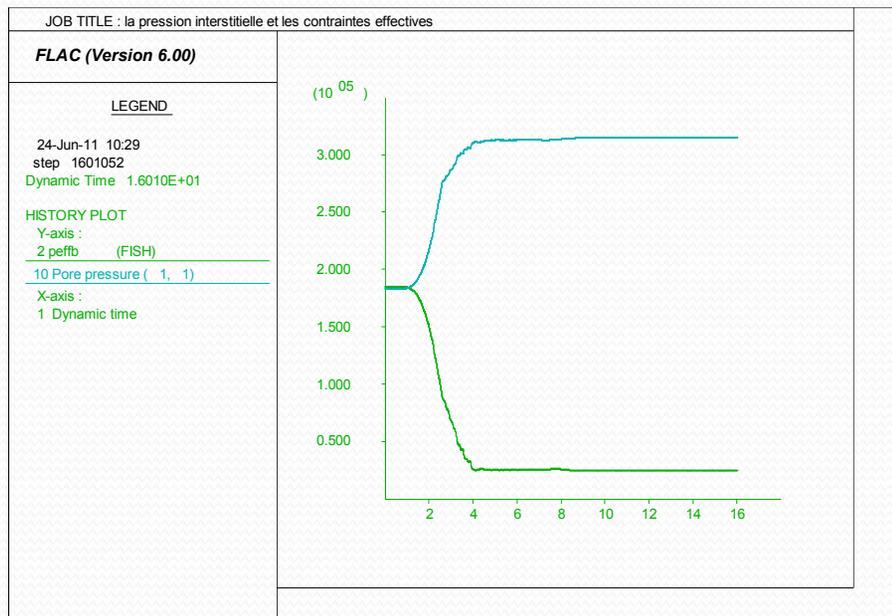
Dans le bac R13 on a observé le même résultat que le bac R21, c'est à dire que le sol sous le bac R13 est potentiellement liquéfiable comme le montre la figure



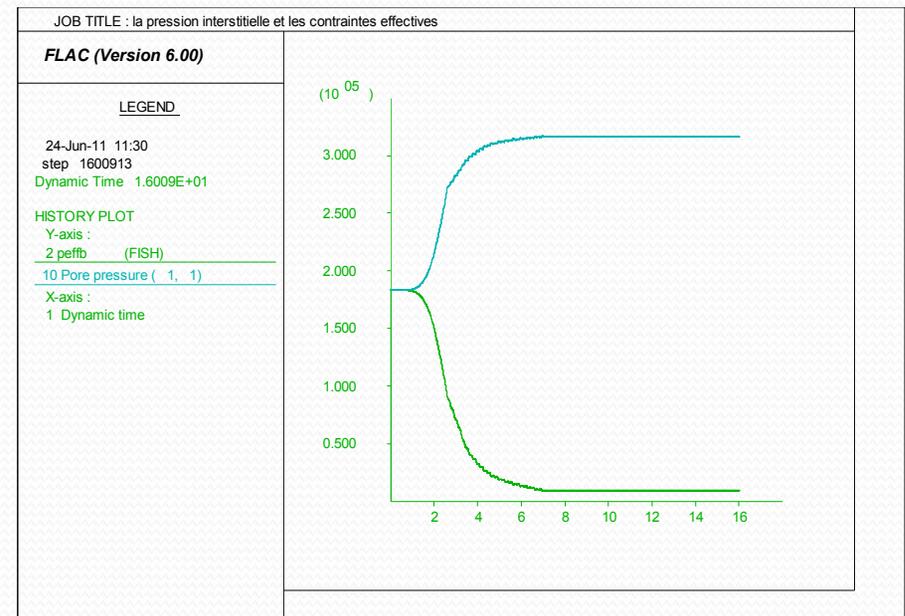
Sol sous le bac R13

Analyse numérique : station de pompage et de comptage

L'analyse numérique Par FLAC, dans les deux station de pompage et de comptage a montré aussi que les sols de ces deux stations sont potentiellement liquéfiables comme le l'indique les deux courbes suivantes



Station de pompage



Station de comptage

Courbes d'évolution de la pression interstitielle et des contraintes effectives

Résumé des résultats d'analyse numérique par FLAC

L'analyse numérique du potentielle de liquéfaction du site de Bejaia par le logiciel FLAC, a montré que les sols de ce site sont potentiellement liquéfiables comme indiqué dans le tableau suivant

bac R21	Sol liquéfiable
Bac R13	Sol liquéfiable
Station de pompage	Sol liquéfiable
Station de comptage	Sol liquéfiable

Résultats d'analyse numérique

Conclusion partielle

L'analyse numérique du potentiel de liquéfaction du site de Bejaia par le logiciel FLAC en utilisant le modèle de Ramberg-Osgood a montré que ce site est potentiellement liquéfiable confirmant ainsi le résultat trouvé par la méthode simplifiée de Seed et Idriss

La convergence des deux méthodes utilisées, empirique et numérique à un même résultat d'évaluation du potentielle de liquéfaction, montre bien l'aptitude et la fiabilité du modèle de Ramberg-Osgood a la simulation numérique du potentiel de liquéfaction des sols

Conclusion générale

L'analyse du risque de liquéfaction du site de Bejaia par la méthode empirique de Seed et Idriss et par la méthode numérique à l'aide du logiciel FLAC 2D V6.0 ont montré que ce site est potentiellement liquéfiable que se soit dans les sols des bacs de stockage d'hydrocarbures ou dans les sols des deux stations de pompage et de comptage

A ces résultats il est donc très nécessaire de donner et d'adopter des techniques d'amélioration des sols du site de Bejaia limitant le risque de liquéfaction

**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**

