

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **GENIE CIVIL**

Spécialité : **GEOTECHNIQUE**

Par : **SENOUS Abdelkrim**

Sujet

Etude géostatistique de la liquéfaction du sol (Aéroport d'Alger)

Soutenu publiquement, le 08/07/ 2021, devant le jury composé de :

M ^r GHOMARI F.	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M ^{me} BENAHCILIF S.	MCB	Univ. Tlemcen	Encadrante
M ^{elle} AYAD F.	MCB	Univ. Tlemcen	Co- Encadrante
M ^r DERFOUF F.M.	MCA	Univ. Saida	Examineur

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à la qualité du comité de pilotage de ce travail. A ce titre, je remercie en particulier :

- Monsieur GHOMARI F. Professeur à l'université, Abou Bakr Belkaid, Tlemcen. pour m'avoir fait l'honneur en acceptant la présidence du jury.

- l'Encadrante, Madame BENAHCILIF S., Maitre de conférence à l'université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, pour sa confiance, sa rigueur scientifique, ses conseils, malgré les occupations et les responsabilités qu'elle assume.

- La Co-Encadrante de mémoire Melle AYAD F., Maitre de conférence à l'université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, pour sa collaboration et ses capacités scientifiques, qui nous a beaucoup aidé pendant toutes les phases de réalisation de ce travail.

- J'adresse mes très sincères remerciements au Mr DERFOUF F. M., Maitre de conférence à l'université de SAIDA pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie toute l'équipe pédagogique du département de génie civil pour tous les efforts fournis tout au long de notre formation académique.

Je remercie le chef de département Mr HAMDAOUI pour son soutien et sa collaboration.

Ma dernière pensée s'adresse à, ma petite famille notamment ma femme Noussaiba, ma petite fille Nour et ma grande famille qui m'ont accompagné inconditionnellement tout au long de ma formation personnelle et académique.

RESUME

La liquéfaction des sols est un phénomène d'instabilité ou de perte de résistance qui peut avoir lieu dans un milieu généralement granulaire saturé ou partiellement saturé.

La méthode simplifiée proposée par Seed et Idriss (1971) est la plus utilisée pour évaluer le potentiel de liquéfaction dans un dépôt de sol. En utilisant la méthode déterministe, le sol est liquéfiable si le coefficient de sécurité est inférieure à l'unité, pas de liquéfaction si le coefficient de sécurité est supérieur à l'unité.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but une évaluation géostatistique du coefficient de sécurité pour la liquéfaction des sols à partir de campagnes pénétrométriques très fournies (site aéroport d'Alger).

Il a été constaté dans plusieurs cas, que la prise en compte du facteur de sécurité uniquement pourrait ne pas être une mesure précise de la liquéfaction, car il ne saisit pas nécessairement l'effet de profondeur des couches potentiellement liquéfiables.

L'analyse géostatistique montre que les variogrammes caractérisés par un palier, une portée, et un effet de pépite sont spatialement bien structurés. Ces différentes caractéristiques montrent que le coefficient de sécurité de la zone d'étude n'est pas réparti de façon aléatoire, les variogrammes sont spatialement bien structurés.

Mots clés

Liquéfaction, géostatistique, Essai de test de pénétration du cône CPT, variogramme, coefficient de sécurité.

ملخص

تسييل التربة هو ظاهرة عدم الإستقرار أو فقدان القوة التي يمكن أن تحدث في وسط حبيبي مشبع بالماء بشكل عام أو مشبع جزئياً

الطريقة المبسطة التي اقترحها سيد و إدريس هي الأكثر استخداماً لتقييم إمكانات التميع في رواسب التربة (1971) باستخدام الطريقة القطعية ، تكون التربة قابلة للتسييل إذا كان عامل الأمان أقل من الوحدة ، ولا يوجد تسييل إذا كان عامل الأمان أكبر من الوحدة.

يهدف العمل المقدم في هذه الرسالة إلى تقييم جيواحصائي لمعامل الأمان لتسييل التربة من مسوحات قياس الاختراق واسعة النطاق (موقع مطار الجزائر العاصمة)

لقد وجد في العديد من الحالات أن الأخذ بعين الاعتبار عامل الأمان وحده قد لا يكون مقياساً دقيقاً للتميع ، لأنه لا يلتقط بالضرورة تأثير العمق للطبقات التي يحتمل تسييلها.

يُظهر التحليل الإحصائي الجغرافي أن المتغيرات التي تتميز بهضبة ونطاق وتأثير كتلة صلبة منظمة جيداً من الناحية المكانية.

توضح هذه الخصائص المختلفة أن معامل الأمان لمنطقة الدراسة لم يتم توزيعه بشكل عشوائي ، وأن المتغيرات منظمة جيداً من الناحية المكانية.

الكلمات المفتاحية

معامل الأمان، variogram، CPT، التسييل ، الإحصاء الجغرافي ، اختبار الاختراق المخروطي

Abstract

Soil liquefaction is a phenomenon of instability or loss of strength that can take place on a generally saturated or partially saturated granular medium.

The simplified method proposed by Seed and Idriss (1971) is the most used to assess the liquefaction potential in a soil deposit. Using the deterministic method, the soil is liquefiable if the safety factor is less than unity, no liquefaction if the safety factor is greater than unity.

The work presented in this thesis aims at a geostatistical evaluation of the safety coefficient for the liquefaction of soils from very extensive penetrometric surveys (Algiers airport site). It has been found in several cases that taking into account the safety factor alone might not be an accurate measure of liquefaction, as it does not necessarily capture the depth effect of potentially liquefiable layers.

Geostatistical analysis shows that variograms characterized by a plateau, a range, and a nugget effect are spatially well structured. These different characteristics show that the safety coefficient of the study area is not distributed randomly, the variograms are spatially well structured.

Keywords

Liquefaction, geostatistics, Cone penetration test CPT, variogram, coefficient of safety.

Sommaire

Introduction générale.....01

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA LIQUEFACTION DES SOLS

I.1.Introduction :	01
I .2.Historique de la liquéfaction :	01
I .2.1. Quelques exemples historiques de cas de liquéfaction :	02
I .2.1.1.Barrage de Fort Peck (Liquéfaction statique des sables) :	02
I .2.1.2.Niigata, Japon (1964)	03
I .2.1.3.Adapazari Effets -Liquéfaction sur les fondations peu profondes	05
I .2.1.4.Port d'Island, Kobe, Japon (1995)	06
I .2.1.5.Chi-Chi, Taiwan (1999)	06
I .2.1.6.Boumerdès, Algérie (2003)	07
I .3.Définition de la Liquéfaction des sols	08
I .4. Evaluation du potentiel de liquéfaction	09
I.4. 1. Méthode de contraintes cycliques	09
I.4.1.1.Le rapport de la contrainte cyclique (Cyclic Stress Ratio), CSR	10
I.4.1.2.Essai de pénétration standard (SPT) (Standard Pénétration Test).....	13
I.4.1.3Résistance à la liquéfaction	15
I.4.1.4Facteurs de corrections selon le poids des terres et les contraintes de cisaillement initiales	16
I.4.2.Estimation de la résistance au cisaillement cyclique non drainée τ_{rc} à partir de l'essai in situ SPT	16
I.4.2.1Méthode de Toshio Iwasaki et al.(1984)	16
I.4.2.2Méthode de Youd et al. (2001).....	17
I.4.2.3 Méthode d'Andrus et al (2004)	17
I.4.2.4 Méthode d'Idriss et Boulanger (2006)	18
I.4.3.Evaluation du CRR par l'essai CPT	19
I.4.3.1.Méthode de Robertson et Wride (1998)	19

I.5. Facteur de sécurité.....	20
I.6. Conclusion	21

CHAPITRE II : LA GEOSTATISTIQUE

II.1. Introduction	22
II.2. L'histoire de la géostatistique.....	22
II.3. Définition de la géostatistique.....	22
II.4. Domaines d'application de la géostatistique.....	22
II.5. Le semi-variogramme.....	25
II.5.1. Le semi-variogramme théorique.....	25
II.5.1.1. Effet de pépite	26
II.5.1.2. La portée	26
II.5.1.3. Le seuil ou palier	26
II.5.2. Le semi-variogramme expérimental (γ_{\square})..... ;.....	27
II.6. Modèles théoriques de variogramme.....	29
II.6.1. L'effet de pépite.....	29
II.6.2. Le modèle exponentiel	31
II.6.3 Le modèle Gaussien	31
II.6.4 Le modèle sphérique	31
II.7. Conclusion	32

CHAPITRE III : EVALUATION DU COEFFICIENT DE SECURITE

III.1. Introduction	33
III.2. Présentation du site.....	33
III.3. Caractérisation du sol.....	34
III.3.1. Constitution du sol	34
III.3.1.1. Nature du sol	34
III.3.1.2. Nappe phréatique	35
III.3.1.3. Caractéristiques mécaniques	35
III.4. Présentation des données	37
III.4.1. Origine des données	37
III.4.2. Présentation des tableaux de données	38
III.4.2.1. Graphes et interprétation des résultats.....	40

**CHAPITRE 4 : PRESENTATION DE RESULTATS DE L'ANALYSE
GEOSTATISTIQUE**

IV.1.Introduction	48
IV.2.Histogramme du coefficient de sécurité	48
IV.3. Variogramme du coefficient de sécurité	49
IV.4. Interprétation carte de variation du coefficient de sécurité	53
IV.5.Conclusion	54
CONCLUSION GENERALE	55
ANNEXES	56
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87

Liste des figures

Figure I.1 : Vue aérienne de la rupture de barrage de Fort Peck (corps de l'armée des États-Unis d'Ingénieurs, 1939, (Mike Jefferies et Ken Been, 2006)	03
Figure I.2 : Inclinaison des bâtiments d'appartements de Kawagishi-cho à Niigata au Japon dues à la chute de la capacité portante du sol par liquéfaction (Peter M. Byrne et al, 2008)..	04
Figure I.3 : Rupture du pont de Showa, à Niigata au Japon, dues à l'épandage latéral dans le sol (d'après Peter M. Byrne et al., 2008).....	05
Figure I.4 : Dommages des édifices, Adapazani, Turquie, 1999	05
Figure I.5 : Le port d'Island, Kobe, 1995.....	06
Figure I.6 : Ebullitions de sable au Comté de Nantou en Taiwan (Dr Hsein, 2002).....	07
Figure I.7 : Renversement d'une structure sous l'effet de la liquéfaction, séisme Boumerdés 2003	08
Figure I.8 : Procédure pour la détermination de la contrainte de cisaillement maximale, $(\tau_{max})_r$ (Seed et Idriss, 1982).....	12
Figure I.9 : Facteur de réduction de la profondeur r_d en fonction de la profondeur (Andrus et Stokoe, 2000).....	12
Figure I.10 : Courbe simplifiée recommandée pour le calcul du CRR à partir des données SPT Seed et Idriss(1997)	14
Figure I.11 : Courbe simplifiée pour le calcul du CRR pour $M_w=7.5$ (d'après Andrus et al, 2004).....	18
Figure I.12 : Courbe simplifiée pour le calcul du CRR pour $M_w=7.5$ (d'après Idriss et Boulanger 2006).....	19
Figure II.1: Représentation schématique des points de mesure de la variable()	24
Figure II.2:Schéma type d'un variogramme.	25
Figure II.3:Schéma de calcul du variogramme expérimental.....	26
Figure II.4: Ajustement d'un modèle théorique (courbe)à un modèle expérimental (croix) .	27
Figure II.5: Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement.....	27
Figure II.6:Semi-variogramme forte irrégularité(pépité pure).....	28
Figure II.7:Semi-variogramme grande régularité (pépité pure).....	28
Figure II.8: type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel.....	29
Figure II.9: type d'un modèle de semi-variogramme gaussien.....	29

Figure II.10: Type d'un modèle de semi-variogramme sphérique.....	30
Figure III. 1 : Localisation de l'aéroport d'Alger.....	31
Figure III. 2 : Réseau hydrographique de la plaine de la Mitidja.....	32
Figure III.3 Implantation des sondages.....	34
Figure III.4 Méthode de Robertson et Wride 1998.....	38
Figure III.5 variation F_s/q_c en fct de profondeur-Sondage S 01	40
Figure III.6 variation CRR/CSR en fct profondeur-Sondage S 01	40
Figure III.7.variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 01	40
Figure III.8 variation F_s/q_c en fct de profondeur Sondage S 02	41
Figure III.9 variation CRR/CSR en fct profondeur Sondage S 02	41
Figure III.10.variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 02	41
Figure III.11 variation F_s/q_c en fct de profondeur Sondage S 03.....	42
Figure III.12 variation CRR/CSR en fct profondeur Sondage S 03.....	42
Figure III.13.variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 03	42
Figure III.14 variation F_s/q_c en fct de profondeur Sondage S 04.....	43
Figure III.15 variation CRR/CSR en fct profondeur Sondage S 04.....	43
Figure III.16.variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 04	43
Figure III.17 variation F_s/q_c en fct de profondeur Sondage S 06	44
Figure III.18 variation CRR/CSR en fct profondeur Sondage S 06.....	44
Figure III.19.variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 06	44
Figure III.20 variation F_s/q_c en fct de profondeur Sondage S 07	45
Figure III.21 variation CRR/CSR en fct profondeur Sondage S 07.....	45
Figure III.22.variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 07	45
Figure III.23 variation F_s/q_c en fct de profondeur Sondage S 08	46
Figure III.24 variation CRR/CSR en fct profondeur Sondage S 08	46
Figure III.25.variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 08	46
Figure III.26 variation F_s/q_c en fct de profondeur Sondage S 09	47
Figure III.27 variation CRR/CSR en fct profondeur Sondage S 09	47
Figure III.28.variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 09	47
Figure III.29 variation F_s/q_c en fct de profondeur Sondage S 10	48
Figure III.30 variation CRR/CSR en fct profondeur Sondage S 10	48
Figure III.31.variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 10	48
Figure IV.1 Histogramme du coefficient de sécurité pour $Z=03m$	50

Figure IV.2 Histogramme du coefficient de sécurité pour $Z=06m$	50
Figure IV.3 Histogramme du coefficient de sécurité pour $Z=09m$	51
Figure IV.4 Histogramme du coefficient de sécurité pour $Z=12m$	51
Figure IV.5: Variogramme expérimentale et théorique du FS pour $Z=03m$	52
Figure IV.6: Variogramme expérimentale et théorique du FS pour $Z=06m$	52
Figure IV.7: Variogramme expérimentale et théorique du FS pour $Z=09m$	53
Figure IV.8: Variogramme expérimentale et théorique du FS pour $Z=12m$	53
Figure IV.9 : Variation du coefficient de sécurité pour $Z=03m$	55
Figure IV.10 : Variation du coefficient de sécurité pour $Z=06m$	55
Figure IV.11 : Variation du coefficient de sécurité pour $Z=09m$	56
Figure IV.12 : Variation du coefficient de sécurité pour $Z=12m$	56

Liste des tableaux

Tableau IV.01: Caractéristiques des variogrammes pour $Z=(03 ;06 ;09 ;12)m$	54
Valeurs qc Sondage N°01.....	56
Valeurs qc Sondage N°02.....	57
Valeurs qc Sondage N°03.....	58
Valeurs qc Sondage N°04.....	59
Valeurs qc Sondage N°06.....	60
Valeurs qc Sondage N°07.....	61
Valeurs qc Sondage N°08.....	62
Valeurs qc Sondage N°09.....	63
Valeurs qc Sondage N°10.....	64
Calcul CSR Sondage N°01.....	65
Calcul CSR Sondage N°02.....	66
Calcul CSR Sondage N°03.....	67
Calcul CSR Sondage N°04.....	68
Calcul CSR Sondage N°06.....	69
Calcul CSR Sondage N°07.....	69
Calcul CSR Sondage N°08.....	70
Calcul CSR Sondage N°09.....	70
Calcul CSR Sondage N°10.....	71
Calcul CRR Sondage N°01.....	72
Calcul CRR Sondage N°02.....	73
Calcul CRR Sondage N°03.....	74
Calcul CRR Sondage N°04.....	75
Calcul CRR Sondage N°06.....	76
Calcul CRR Sondage N°07.....	77
Calcul CRR Sondage N°08.....	78
Calcul CRR Sondage N°09.....	79
Calcul CRR Sondage N°10.....	80
Calcul FS Sondage S01.....	81

Calcul FS Sondage S02.....	82
Calcul FS Sondage S03.....	83
Calcul FS Sondage S04.....	84
Calcul FS Sondage S06.....	84
Calcul FS Sondage S07.....	85
Calcul FS Sondage S08.....	85
Calcul FS Sondage S09.....	86
Calcul FS Sondage S10.....	86

LISTE DES NOTATIONS

C.P.T : Essai de test de pénétration de cône.
CSR : Rapport de résistance cyclique.
CRR : Rapport de contrainte cyclique générée par le séisme.
CRR7.5 : Taux de résistance cyclique pour une magnitude de 7.5
F : La force horizontale exerce sur la colonne du sol en (KN/m²).
a_{max}: Accélération maximale du sol en surface en (m/s²).
m : La masse de la colonne en (Kg).
Z : La longueur de la colonne en (m).
γ : Poids volumique du sol en (KN/m³).
γ_h : Poids volumique humide du sol en (KN/m³).
σ_{v0}: La contrainte verticale totale (KPa).
σ'_{v0}: La contrainte verticale effective (KPa).
τ_{max} : La contrainte de cisaillement maximale.
τ_{cyc} : la contrainte cyclique due à la sollicitation sismique.
r_d: Facteur de réduction de contrainte lié à la flexibilité de la colonne de sol.
q_c : Résistance à la pénétration du cône ou résistance de pointe.
Q_c : l'effort de pointe
A_c : de la plus grande section droite de la pointe
Q_t : Effort total d'enfoncement.
Q_{st} : Effort de frottement latéral sur l'ensemble du fut.
f_s : Le frottement latéral unitaire local
R_f : Le rapport de frottement
I_f : Indice de frottement.
q_{c(IN)} : Résistance à la pointe corrigée.
C_Q : Facteur de normalisation de la résistance à la pointe.
n : Un exposant.
P_a : Pression atmosphérique égale 100 KPa.
Q : la résistance de pointe normalisée.
F : le taux de frottement normalisé du manchon pénétrométrique.
IC : Indice comportement de sol
KC : Facteur correcteur
q_{c(IN)cs} : est la résistance à la pénétration normalisé
M_w : La magnitude du séisme.
MSF : Le facteur de correction de la magnitude
K_σ : facteur de correction du au poids des terres appliqué au CRR7.5.
f: Est en fonction de la densité relative.
W_L: limite de liquidité IP : indice de plasticité
A : Coefficient d'accélération de zone
kh : Coefficient d'accélération sismique horizontal
c : Cohésion
c' : Cohésion effective
c_u : Cohésion non drainée
cc : Indice de compression
φ : Angle de frottement interne

φ' : Angle de frottement interne effectif
 FS : Coefficient de sécurité
 U : Pression interstitielle
 U_l : Effort dû à la pression d'eau latérale
 V : Effort vertical
 H : Effort horizontal
 W : Poids des terres
 γ_d : Poids volumique sec
 γ_{sat} : Poids volumique saturé
 γ_w : Poids volumique de l'eau
 θ : L'angle de frottement de la tranche
 σ' : Contrainte effective
 α : Inclinaison de la surface de rupture
 τ : Contrainte de cisaillement mobilisée
 a : Portée du semi-variogramme.
 $C(0)$: Palier du semi-variogramme
 $C0$: Effet de pépité.
 h : Pas du semi-variogramme ou inter-distance moyenne.
 G : Champ ou gisement
 $N(h)$: Nombre de paires d'observations séparées par la distance h .
 Var : Variance.
 σ_2 : Variance d'estimation.
 σ : Ecart-type.
 $\gamma(h)$: Semi-Variogramme théorique.
 $\gamma_e(h)$: Semi-Variogramme expérimental
 θ : Angle directionnel du variogramme.
 $N(h, \theta)$: Le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ

Introduction générale:

L'étude du sol est une étape incontournable en amont de tout projet de construction. Le maître d'ouvrage (et/ou maître d'œuvre) a tout intérêt de prévoir en amont les solutions techniques à envisager pour assurer la pérennité de son projet. Les aléas géotechniques pouvant impacter un projet de construction sont de natures variées et les risques qui en résultent peuvent avoir des conséquences graves.

L'étude de sol a pour objectif d'identifier, de qualifier et de quantifier ces aléas et doit constituer un outil d'aide à la décision permettant d'adopter les solutions techniques assurant la pérennité du projet.

Les contraintes économiques et techniques imposent au géotechnicien de travailler avec un nombre limité de sondages et/ou d'essais. La reconnaissance des sols se fait à partir d'informations ponctuelles, issues de différentes investigations qui auront été réalisées sur la parcelle d'étude. Bien souvent, le sol présente une grande hétérogénéité de ses propriétés. Le géotechnicien peut avoir recours à des outils complémentaires, pour définir les stratégies à adopter pour une meilleure reconnaissance géotechnique d'un site avant la construction d'un ouvrage (Lagabrielle R. , 1986, 2007 ; Guerrero, 2014).

Les méthodes géotechniques sont souvent onéreuses et ne donnent que des estimations ponctuelles des propriétés mécaniques des sols.

La géostatistique peut être un bon moyen de coupler les méthodes géotechniques. La mise en œuvre d'outils géostatistiques permet d'estimer ou de simuler des propriétés physiques en des points non prospectés d'une parcelle.

Dans le premier chapitre, après définition du phénomène de liquéfaction des sols et présentation des cas historiques de liquéfaction, un aperçu général sur le développement et l'utilisation des méthodes d'analyse de calcul du potentiel de la liquéfaction a été présenté.

Dans le deuxième chapitre une approche géostatistique a été présentée.

L'objectif annoncé dans le chapitre trois est de présenter en détail le site d'étude, et de citer quelques méthodes déterministes pour le calcul du potentiel de liquéfaction. La méthode de Seed et Idriss a été utilisée pour caractériser le comportement du sol ainsi que la définition de l'état de liquéfaction dans le modèle déterministe par le facteur de sécurité

Dans le chapitre quatre, les résultats de l'analyse géostatistique ont été présentés.

Le mémoire se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA LIQUEFACTION DES SOLS:

I.1. Introduction :

L'évaluation du potentiel de liquéfaction cyclique est un problème important pour la majorité des géotechniciens et d'ingénieurs particulièrement ceux concernés par les travaux en milieux urbains et maritimes.

Ce chapitre fait objet d'une définition de la liquéfaction des sols et une présentation des méthodes utilisées pour l'estimation des coefficients de sécurité F_s , ainsi quelques exemples de dégâts produit ce phénomène.

I .2. Historique de la liquéfaction :

Le phénomène de liquéfaction des sols est abordé pour la première fois en 1819 par James MacMurdo l'hors d'un séisme ayant frappé la région située entre Karachi et Bombay, dans le Nord-Ouest de l'Inde.

A cette époque, MacMurdo est le représentant de la couronne anglaise dans cette région et il décrit (sans utiliser le terme de liquéfaction) des phénomènes d'eau et de sable éjectés du sol ainsi que des mouvements lents d'affaissement qui sont aujourd'hui assimilés au phénomène (Seed et Idriss, 1982). MacMurdo compare également les dommages engendrés aux ouvrages fondés sur différents types de sols, soulignant l'influence locale de ceux-ci sur les effets des tremblements de terre (Seed et Idriss, 1982).

Bien que certaines études utilisant les paramètres de la mécanique de sols ont été menées par Casagrande en 1936 (Seed et Idriss, 1982), ce n'est qu'en 1948 qu'apparait le terme de « liquéfaction spontanée » utilisé par Terzaghi et Peck pour définir le changement soudain dans le comportement d'un dépôt de sable lâche soumis à des perturbations extérieures le conduisant vers un matériau ayant les caractéristique d'un fluide (Terzaghi et Peck, 1967). Le terme « liquéfaction » a également été utilisé dans l'article intitulé « The Behavior of Sand During Vibration » présenté par Mogami et Kubo en 1953 à la troisième conférence sur la Mécanique des Sols et des travaux de fondations à Zurich (Kramer, 1996).

Malgré ces quelques descriptions du phénomène, l'intérêt scientifique sur la question n'apparait qu'en 1964 suite à deux séismes majeurs, à Anchorage (Etats-Unis) et Niigita (Japon), ayant causés d'importants dommages à de nombreuses structures qui ont été liés, entre autre, au phénomène de liquéfaction des sols. Depuis lors, les préoccupations concernant la sécurité publique, mais également la sécurité d'ouvrages à hauts risques tels que

les barrages et les centrales nucléaires, ont conduit à la réalisation de nombreuses recherches afin de développer une meilleure compréhension ainsi que des outils de prédiction du phénomène.

Plusieurs définitions existent, regroupant plusieurs phénomènes tels que la **liquéfaction proprement dite et la mobilité aux charges cycliques** (Holtz et Kovacks, 1991 ; Kramer, 1996).

Dans la pratique, ces deux réponses des sols sont regroupées sous le terme global du **phénomène de liquéfaction** car elles peuvent produire des effets similaires tels que des cônes ou bouillons de sable, apparaissant suite à l'éjection d'eau du sol entraînant dans sa course des particules sableuses.

Ces deux types de réponses présentent également des différences, notamment au niveau des déformations engendrées ainsi que selon le mode de chargement nécessaire pour les développer (Gilles Guillot-2004)

I .2.1. Quelques exemples historiques de cas de liquéfaction :

La liquéfaction des sols est un problème sérieux capable de causer des dégâts souvent irréparables, tant à des ouvrages existants qu'à de nouvelles constructions, ainsi la liquéfaction peut provoquer :

- ✓ Le basculement d'immeuble.
- ✓ la rupture des barrages (remblais hydraulique).
- ✓ la rupture des culées des ponts.
- ✓ le tassement des dépôts de sable, le déplacement latéral du terrain.

Parmi les exemples les plus connus des dégâts engendrés par la liquéfaction on cite :

I .2.1.1. Barrage de Fort Peck (Liquéfaction statique des sables) :

Le cas de barrage de Fort Peck est un exemple classique de la liquéfaction statique. La construction de barrage a été commencée en 1934 sur Missouri River au Montana, environ de 70 milles de sud de la frontière canadienne. Les sables de River et les sols alluviaux granuleux d'amont ont été pompés et déchargés des canalisations le long des bords extérieurs, de ce fait formant des plages inclinant vers la piscine de noyau central. La gradation en résultant du matériel déposé était du plus brut sur le bord externe au plus fin dans la piscine de noyau. La fondation s'est composé des sables alluviaux, graviers et argiles.

Un grand glissement s'est produit dans la coquille ascendante du barrage près de la fin de la construction en 1938 (Figure I.1). À l'heure de la rupture du barrage était d'environ 60 m de haut. La rupture s'est produite au-dessus d'une section de 500 m et a été précédé en

enflant plus d'au moins 12 heures avant la rupture. À un moment donné après que ces contraintes initiales qu'une glissière d'écoulement a développées, avec les déplacements très grands (jusqu'à 450 m) et très à plat (pentes finale de 20H : 1V). L'aspect de la rupture était celui des blocs intacts dans une masse de matériel complètement perturbé. Il y avait des zones entre les îles du matériel intact qui ont semblé être en état rapide avec des ébullitions de sable évidentes.

La Figure I.1 montre une vue aérienne de la rupture de barrage de Fort Peck illustrant la nature du glissement et de la grande distance s'est déplacé.

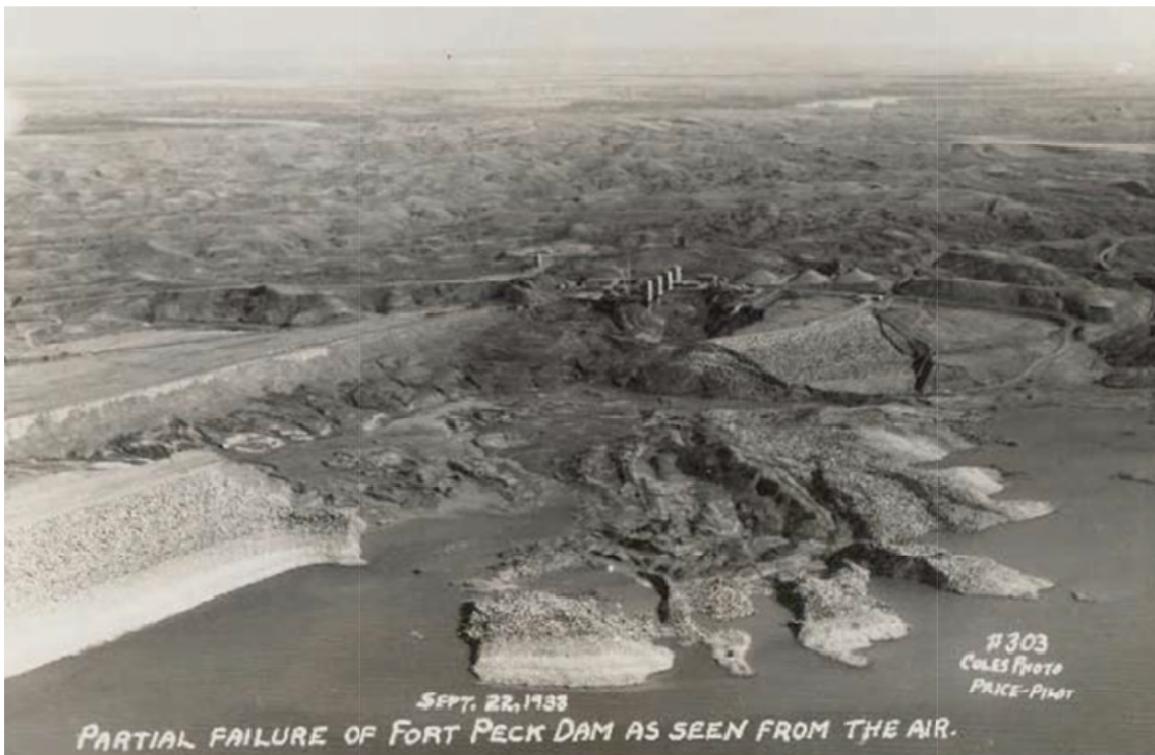


Figure I.1 : Vue aérienne de la rupture de barrage de Fort Peck (corps de l'armée des États-Unis d'Ingénieurs, 1939, (Mike Jefferies et Ken Been, 2006) .

I .2.1.2. Niigata, Japoonn (1964)

La ville de Niigata est située à l'estuaire des fleuves d'Agano et Shinano.

Cet environnement géologique a engendré des dépôts de sables lâches avec une nappe phréatique peu profonde. La surface du sol dans ces espaces est relativement plate.

Durant le séisme de Niigata le 16 Juin, 1964 de magnitude 7.5 sur l'échelle de Richter, la liquéfaction a été observée dans les espaces près des rivières. Cette liquéfaction a été accompagnée par des ruptures de fondation, des effondrements des ouvrages de retenue et des épandages latéraux dans le sol ce qui a causé de sévères dommages dans plusieurs

structures tels que les ponts, les bâtiments, les réseaux enterrés. Les séries de bâtiments d'appartements à Kawagishi-cho sont devenues très connues comme symbole des effets de la liquéfaction des sols (Figure I.2).

Lorsque la liquéfaction s'est produite, la résistance du sol sous fondations s'est réduite de sa valeur initiale, engendrant une capacité portante insuffisante pour supporter les bâtiments, à la résistance résiduelle du sol liquéfié. Puisque la résistance résiduelle était inférieure à la contrainte de cisaillement imposée par le poids des bâtiments, la chute de la capacité portante du sol s'est produite engendrant de très grandes déformations.



Figure I.2 : Inclinaison des bâtiments d'appartements de Kawagishi-cho à Niigata au Japon dues à la chute de la capacité portante du sol par liquéfaction (Peter M. Byrne et al, 2008).

Le pont de Showa près de la rivière de Shinano s'est effondré, car lorsque la liquéfaction s'est produite, l'épandage latérale du sol a causé le déplacement du sol sous le lit de la rivière ce qui a imposé des pressions sur les pieux de fondation qui ont, par la suite, subi une déflexion et se sont déplacés (Figure I.3).



Figure I.3 : Rupture du pont de Showa, à Niigata au Japon, dues à l'épandage latéral dans le sol (d'après Peter M. Byrne et al., 2008)

I .2.1.3. Adapazari Effets -Liquéfaction sur les fondations peu profondes :

Domages aux édifices eu lieu tout au long Adapazari, Turquie, lors du séisme de Kocaeli 1999 (Figure I.4). Une cause majeure de dommages était la liquéfaction des récents dépôts alluviaux qui sous-tendu de grandes parties de la ville. Le résultat a été des échecs de capacité portante pour d'innombrables bâtiments, dont la plupart ont été pris en charge sur les fondations superficielles.



Figure I.4 : Dommage des édifices, Adapazani, Turki, 1999. (site internet)

I .2.1.4. Port d'Island, Kobe, Japon (1995) :

Le séisme de Hyogoken_Nambu en 1995 a causé des cas de liquéfaction, particulièrement dans les espaces récupérés tel que le port d'Island, à Kobe au Japon, Ce séisme était la cause de plusieurs dommages.(Figure I.5) :



Figure I.5 : Le port d'Island, Kobe, 1995 (Benahchilif, 2016)

I .2.1.4. Chi-Chi, Taiwan (1999) :

Les sols en place sont constitués de couches de sol sableux très lâche susceptible à la liquéfaction et le niveau de la nappe phréatique varie de 0,5 m à 5 m de profondeur, ce qui justifie la liquéfaction survenue sur les lieux, après le séisme de Chi-Chi de magnitude 7,6 sur l'échelle de Richter (d'après Dr Hsein Juang, 2002), et qui a causé différents dommages (Figure I.6).



Figure I.6 : Ebullitions de sable au Comté de Nantou en Taiwan (Dr Hsein, 2002).

I .2.1.5. Boumerdès, Algérie (2003) :

Le nord de l'Algérie est situé le long de la frontière entre les plaques Eurasia et Africa qui est une région sismique très active. Le séisme du 21 Mai 2003 à Boumerdes a été localisé le long de la marge nordique de l'Atlas Tellien.

La faille de Zemmouri qui n'était pas connue auparavant était la source de ce séisme qui a causé des dommages significatifs dans la région entre Dellys et Alger. Le *CRAAG* (the Center of Research in Astrophysics, Astronomy and Geophysics) a localisé l'épicentre des secousses dans la mer Méditerranéenne. La magnitude locale était de 6.8 sur l'échelle de Richter, (D'après le *EERI* Earthquake Engineering Research Institute, Avril 2003) .

Des fractures de la surface du sol ont été observées dans les régions épacentrales : la région de Corso, le port de Zemmouri et près de Dellys.

Une grande partie du secteur côtier est constituée de larges plaines alluviales liées du côté sud à la ceinture de l'Atlas par des roches métamorphiques et le niveau de la nappe phréatique est généralement profond.

Bien qu'il soit probable que les insuffisances structurales aient été la cause principale des dommages, les sols sableux de Boumerdes sont liquéfiés dans les espaces de la nappe phréatique peu profonde ce qui a également contribué aux dommages dans cette région.

La liquéfaction et les épandages latéraux étaient présents dans les secteurs près de la rivière d'Isser et dans les gisements étendus de sable de plage.

Des ébullitions de sable et des épandages latéraux dans le sol ont été observées près du pont traversant la rivière d'Isser (voir figure 1.07).



Figure 1.7 Liquéfaction du sol aux abords de l'oued Isser. Séisme Boumerdès, 2003 (Benahchilif 2016)

I.3. Définition de la Liquéfaction des sols :

De manière générale, la liquéfaction consiste à une génération de pression interstitielle suite à un chargement statique ou dynamique d'un sol pulvérulent saturé, présentant une capacité de drainage insuffisante. Cette augmentation de pression interstitielle provoque une diminution des contraintes effectives.

Hazen a expliqué ce phénomène par une concentration de pressions induite par un mouvement ou une déformation dans le matériau. Lorsque ceci se produit rapidement, l'eau contenue entre les pores est mise sous pression. L'augmentation continue de cette pression interstitielle conduit à une diminution des forces inter granulaires dans le sol, et le matériau perd toute sa résistance lorsque la pression interstitielle devient égale à la contrainte effective initiale. (Seed et Idriss, 1967).

Le sol se comporte alors comme un fluide ayant la densité du sol saturé.

I.4. Evaluation du potentiel de liquéfaction :

Par définition, le coefficient de sécurité vis à vis du risque de liquéfaction est défini comme le rapport de la résistance au cisaillement cyclique non drainée, déterminée à partir d'essais de laboratoire ou à partir d'essais en place, à la contrainte de cisaillement induite par la sollicitation sismique évaluée par un calcul de réponse dynamique ou de façon simplifiée :

$$F_s = \tau_{\max} / \tau_{\text{cyc}} \quad (\text{I.1})$$

τ_{\max} : La contrainte de cisaillement maximale.

τ_{cyc} : la contrainte cyclique due à la sollicitation sismique.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction et peuvent être divisées en trois catégories : **méthodes des contraintes** (Seed et Idriss (1971)), **méthode de déformation** (Dobry et al, 1982) et **méthode énergétiques** (Law et al 1990).

Ces trois méthodes peuvent être implémentées en approche déterministe et probabiliste. La méthode déterministe pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction donne la réponse oui ou non si le sol est liquéfiable ou non. L'approche probabiliste évalue la liquéfaction en termes de probabilité d'occurrence. L'avantage majeur des approches probabilistes, c'est que les incertitudes associées aux paramètres du sol sont quantifiées. (Martin et al, 1975).

I.4.1. Méthode de contraintes cycliques :

La méthode des contraintes pour évaluer le potentiel de liquéfaction, initiée par Seed et Idriss (1967), a été largement utilisée (par exemple, Seed et Idriss 1971, Shibata 1981, Tokimatsu et Yoshimi 1983, Seed et al. 1985, Youd et al. 2001, Cetin et al. 2004, Idriss et Boulanger 2004, Lenz et Baise 2007, Jafarian et al. 2013, Benahchilif et al, 2004 et Ahmadi et Paydar 2014, Ayad et al 2014, Uyanik et al. 2013, Vaid et al. 1981/1990/1985). L'idée de base, telle qu'adoptée par de nombreux chercheurs, est de comparer les rapports des contraintes cycliques (CSR) avec les rapports de résistance cyclique (CRR) du sol.

I.4.1.1. Le rapport de la contrainte cyclique (Cyclic Stress Ratio), CSR :

La contraintes de cisaillement développée à la profondeur du sol h à l'instant t due à la propagation verticale des ondes de cisaillement peut être calculée comme suite :

$$\tau(t)_{\text{rigide}} = \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a(t) \quad (I.2)$$

Si la masse de sol au-dessus de la profondeur h est supposé rigide, $a(t)$ est l'accélération à la surface du sol à l'instant t , γ est le poids volumique du sol, et g est l'accélération de la pesanteur. (Hynes et OQlsen, 1998) .

En raison du fait que le sol se comporte comme un corps déformable (Figure I.8), la contrainte de cisaillement réelle développée sera inférieure à celle prévue par l'équation (I.2), pour une valeur donnée de l'accélération à la surface du sol, $a(t)$.

Un facteur de réduction des contraintes, r_d , doit être incorporé dans l'équation.

Pour calculer le facteur r_d plusieurs modèles ont été proposés. Lia et Whithman (1986) ont proposés les relations suivantes :

$$r_d = 1 - 0.00765 \cdot d \text{ pour } d < 9,15 \text{ m} \quad (I.3)$$

$$r_d = 1,174 - 0.0267 \cdot d \text{ pour } 9,15 < d \leq 20 \text{ m} \quad (I.4)$$

Avec d est la profondeur du sol en mètre.

Ces équations donnent une valeur moyenne de r_d et sont présentées sur la Figure (I.9) avec l'intervalle des valeurs proposées par Seed et Idriss (pour les premiers 15m de profondeur). (Idriss et Boulanger, 2004) Comme alternative pour l'équation (I.4), (Blake 1999) propose une seule équation pour le calcul de r_d :

$$r_d = \frac{1 - 0.4113 \times Z^{0.5} + 0.04052 \times Z + 0.001753 \times Z^{1.5}}{1 - .4177 \times Z^{0.5} + 0.05729 \times Z - 0.006205 \times Z^{1.5} + 0.001210 \times Z^2} \quad (I.5)$$

Au Japon, r_d est simplement pris égal à :

$$r_d = 1 - 0.0015Z \quad (I.6)$$

Les facteurs influençant r_d à considérer dans les petits projets sont la profondeur et les valeurs moyennes obtenues par les équations proposées.

En général, la méthode simplifiée n'est pas vérifiée pour des profondeurs supérieures à 15m. C'est ainsi que pour des projets importants, les valeurs de r_d sont à discuter. La réévaluation des données et de leur interprétation ont amené Idriss (1999) à proposer les expressions suivantes (Figure I.9).

$$r_d = \exp(\alpha(z) + \beta(z)M_w) \quad (I.7)$$

$$\alpha(z) = -1,012 - 1,126 \sin\left(\frac{z}{11,73} + 5,133\right) \quad (I.8)$$

$$\beta(z) = 0,106 + 0,118 \sin\left(\frac{z}{11,28} + 5,142\right) \quad (I.09)$$

Un système de calcul de la moyenne pondérée est nécessaire pour convertir les formes irrégulières de l'histoire temps des contraintes de cisaillement sismiques en série équivalente plus simple des contraintes cycles uniformes. En pondération appropriée des cycles de contraintes individuelles fondées sur des données d'essais en laboratoire, il a été constaté que l'amplitude raisonnable à choisir pour la «moyenne» ou de contrainte uniforme équivalent, τ_{av} , est d'environ 65% de la contrainte de cisaillement maximale τ_{max} .

$$\tau_{av} = 0,65 \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d \quad (I.10)$$

Où a_{max} est l'accélération maximale à la surface du sol.

Une variété de méthodes de normalisation peut être ensuite utilisée pour convertir les série irréguliers des cycles contraintes de cisaillement cycliques à un nombre "équivalent" de cycles uniformes avec une amplitude τ_{av} .

Le rapport de contrainte cyclique, CSR, telle que proposée par Seed et Idriss (1971), est définie comme la contrainte de cisaillement cyclique moyenne, τ_{av} , développée sur une surface horizontale des couches de sol dues à la propagation verticale des ondes de cisaillement normalisée par la contrainte initiale verticale effective σ'_v .

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d \quad (I.11)$$

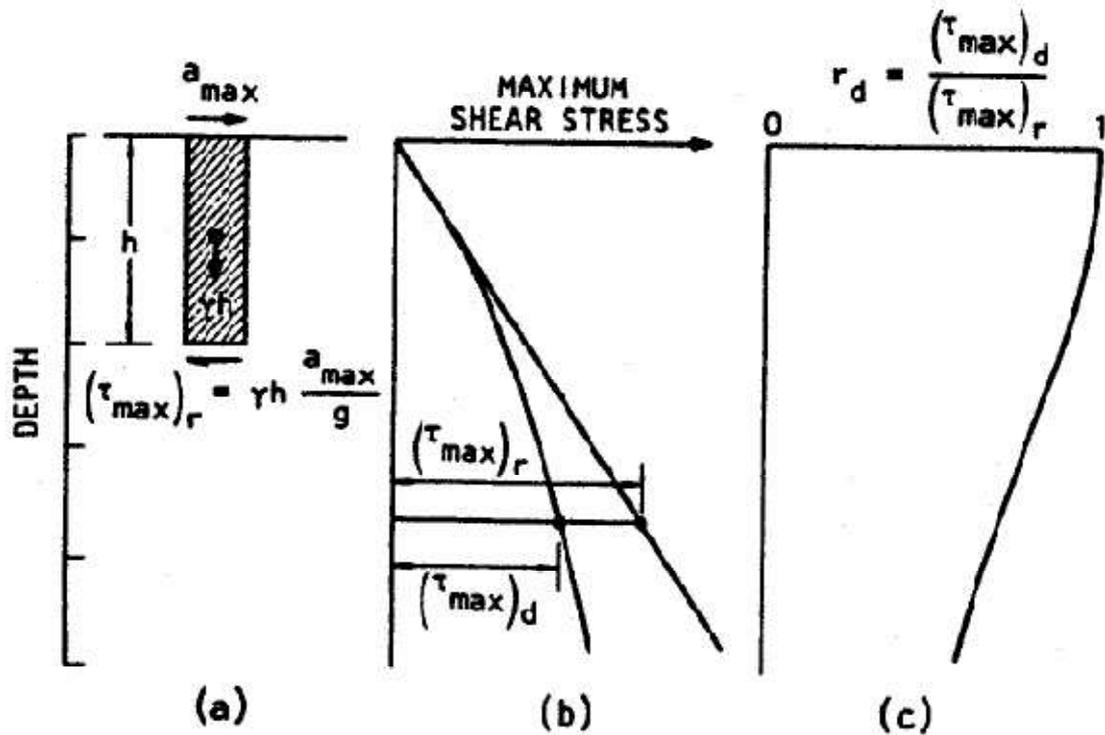


Figure I.8 : Procédure pour détermination de la contrainte de cisaillement maximale, $(\tau_{max})_r$ (Seed et Idriss, 1982)

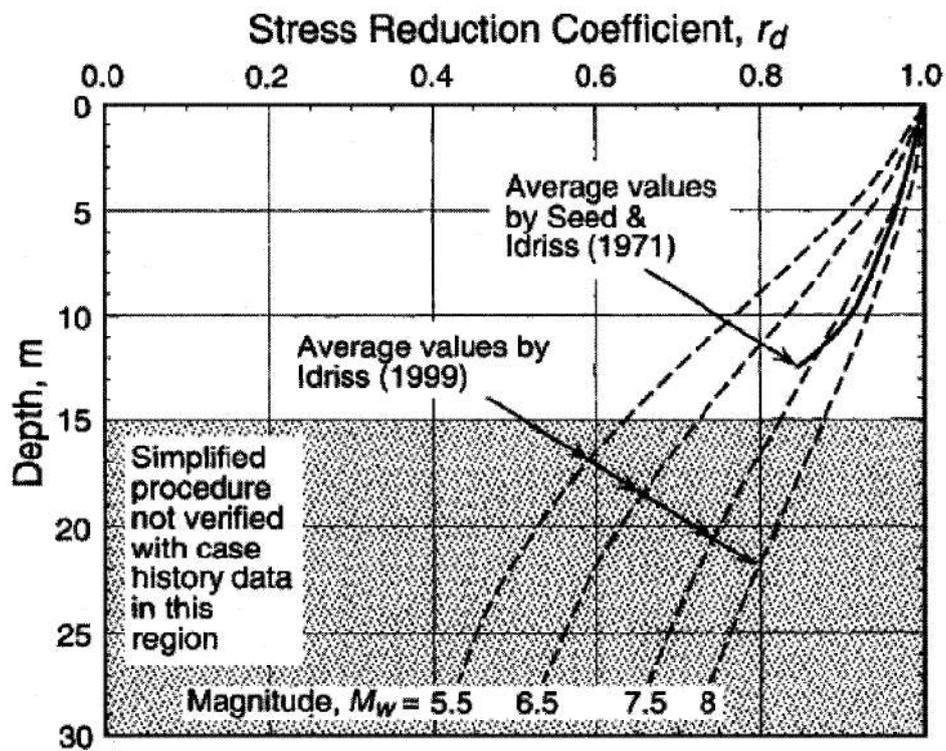


Figure I.9 : Facteur de réduction de la profondeur r_d en fonction de la profondeur (Andrus et Stokoe, 2000)

Pour incorporer l'effet de la magnitude des secousses sismiques (la durée du séisme ou le nombre de cycles), un facteur de correction de la magnitude va être ajouté dans l'équation suivante :

$$CSR_{7.5} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{a_{\max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot \frac{r_d}{MSF} \quad (I.12)$$

Le facteur de correction de la magnitude est une fonction de la magnitude du séisme et il est exprimé par Youd et al (2001) par :

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56} \quad (1.13)$$

Il convient de noter que différentes formules de MSF et r_d ont été proposées par de nombreux chercheurs (par exemple, Youd et al. 2001; Idriss et Boulanger, 2006; Cetin et al. 2004).

I.4.1.2. Essai de pénétration standard (SPT) (Standard Pénétration Test) :

Les critères d'évaluation de la résistance de liquéfaction basée sur le test de pénétration standard (SPT) ont été plutôt vigoureux au cours des années. Ces critères sont largement incorporés dans le graphe reliant CSR avec $N_{1.60}$ reproduit dans la figure I.10.

Ce graphique montre la CSR et $N_{1.60}$ calculé des sites où l'effets de liquéfaction ont été ou non observés à la suite des tremblements de terre passés le long des courbes de CRR séparer les données indicatives de la liquéfaction de données indicatives de non liquéfaction pour différents pourcentage de fine. La courbe CRR de la figure I.10, sont valables uniquement pour magnitude 7,5 (Andrus et Stokoe, 2000).

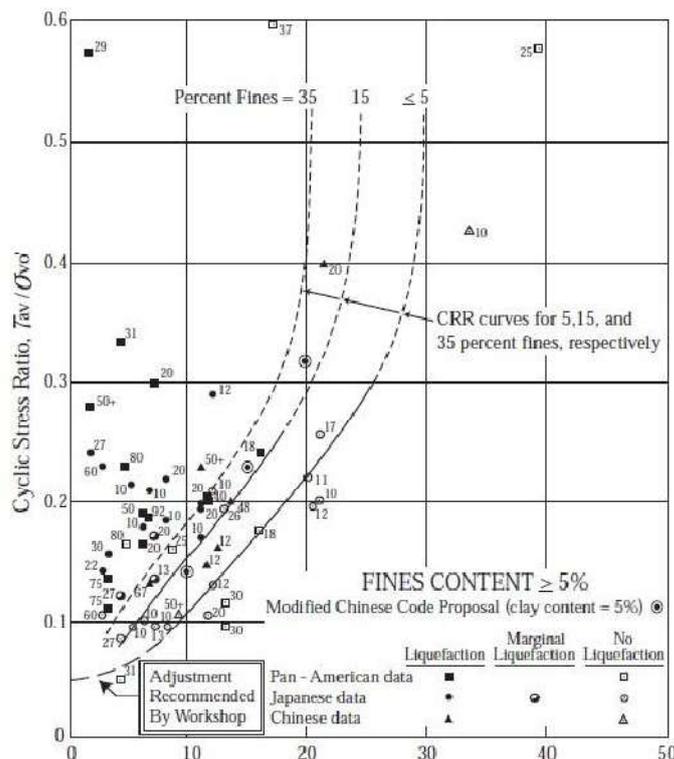


Figure I.10 : Courbe simplifiée recommandée pour le calcul du CRR à partir des données SPT Andrus et Stokoe, (2000)

L'essai de pénétration standard est l'essai le plus utilisé. Il consiste à déterminer le nombre de coup N nécessaire à l'enfoncement d'un carottier d'une profondeur de 30 cm, tout en prélevant des échantillons remaniés indicatifs des différentes couches traversées. Cette méthode fait intervenir l'indice de pénétration standard normalisé N_{1.60cs} où la notation indicielle associée à la valeur de N a la signification suivante : (Azadi et al, 2010)

- ✓ 1 : indique une valeur normalisée pour une charge d'une atmosphère (100 kPa),
- ✓ 60 : indique une valeur normalisée pour une efficacité de 60% de l'énergie totale fournie par le mouton,
- ✓ cs : indique une valeur normalisée pour un sable propre (clean sand), soit sans particules fines.

Ces conditions ne sont quasiment jamais rencontrées dans la réalité et il faut donc appliquer des facteurs de corrections appropriés.

Dans le cas d'un sable propre, l'indice de pénétration standard N_{1.60} peut être déterminé comme suit (Youd et al, 2001) :

$$N_{1.60} = N \cdot CN \cdot CR \cdot CS \cdot CB \cdot CE \quad (I.14)$$

où

- ✓ N : nombre de coup réellement nécessaires mesurés à l'enfoncement,

- ✓ CN : facteur de correction pour la contrainte de confinement effective (selon la profondeur),
- ✓ CE : facteur de correction pour l'énergie transmise par le mouton,
- ✓ CB : facteur de correction pour le diamètre du trou de forage,
- ✓ CR : facteur de correction pour la longueur des tiges (profondeur du trou),
- ✓ CS : facteur de correction par rapport à la méthode d'échantillonnage.

Ces différents facteurs de correction dépendent de différents paramètres et sont présentés dans Youd et al. (2001). Les valeurs proposées pour les termes de correction sont résumées sur le tableau 3.1. S'il y a présence de particules fines, la correction suivante doit également être apportée (Youd et al. 2001).

$$N_{1.60CS} = \alpha + \beta N_{1.60} \quad (I.15)$$

Les coefficients α et β sont fonction de pourcentage de particules fines en masse correspondant au passant du tamis #200. Ils prennent les valeurs suivantes selon les cas (Youd et al. 2001).

$$\begin{cases} \alpha=0 \\ \beta=1 \end{cases} \quad \text{pour } F_c \leq 5\%$$

$$\begin{cases} \alpha = \exp((1,76(-190/F_c^2))) \\ \beta = (0,99 + (F_c^2/1000)) \end{cases} \quad \text{pour } 5\% \leq F_c \leq 35\% \quad (I.16)$$

$$\begin{cases} \alpha=5 \\ \beta=1,5 \end{cases} \quad \text{pour } F_c \geq 35\%$$

I.4.1.3 Résistance à la liquéfaction :

La capacité d'un élément de sol à résister à la liquéfaction peut être estimée par le rapport de résistance cyclique (Cyclic Resistance Ratio, CRR). Ce dernier s'exprime par le quotient entre la résistance moyenne au cisaillement du volume de sol et la contrainte verticale effective initiale. Il peut être calculé de différentes façons suivant le type de test utilisé. (Davis et Berril, 1982), (Davoodi et al, 2013).

La valeur du CRR d'un sol fait intervenir le facteur de correction de magnitude (MSF) et la contrainte effective de confinement (qui est exprimée par le facteur K_σ). Les méthodes présentées plus loin établissent toutes des CRR formulés pour un séisme de magnitude 7.5.

Pour pouvoir comparer CSR et CRR, il est nécessaire qu'ils soient exprimés pour une même magnitude. Seed et Idriss (1971) ont développé le facteur de correction de magnitude MSF reliant le CRR d'une secousse de magnitude M à celui d'une secousse de magnitude 7.5 (et inversement), pour une contrainte $\sigma'_{v0} = 1 \text{ atm}$, tel qu'exprimé par les expressions suivantes :

$$CRR_{M, \sigma'_{v0}} = CRR_{M=7.5, \sigma'_{v0}=1} \cdot MSF \cdot K_{\sigma} \quad (I.17)$$

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_{v0}=1} = CRR_{M, \sigma'_{v0}} / (MSF \cdot K_{\sigma}). \quad (I.18)$$

I.4.1.4. Facteurs de corrections selon le poids des terres et les contraintes de cisaillement initiales :

L'état des contraintes joue un rôle important sur la résistance à la liquéfaction d'un volume de sol. L'augmentation de résistance engendrée par une plus grande contrainte de confinement serait indépendante des corrections appliquées sur les résultats des différents essais réalisés sur terrain.

Pour pouvoir utiliser la méthode dans le cas de contraintes de confinement élevées, Youd et al. (2001) proposent d'utiliser la méthode de Hynes et Olsen (1999) qui corrige la résistance à la liquéfaction des sables et sables limoneux à l'aide de l'expression suivante :

$$K_{\sigma} = (\sigma'_{v0} / P_a)^{f-1} \quad (I.19)$$

Où

- ✓ K_{σ} : facteur de correction du au poids des terres appliqué au $CRR_{7.5}$
- ✓ σ'_{v0} : Contrainte effective verticale initiale [kPa],
- ✓ P_a : pression atmosphérique (100 kPa),
- ✓ f : est un exposant dépendant de la densité relative du sol, tel que :

pour $40\% \leq Dr \leq 60\%$	$0,7 \leq f \leq 0,8$	
pour $60\% \leq Dr \leq 80\%$	$0,6 \leq f \leq 0,7$	(I.20)

Dr : représente la densité relative.

I.4.2. Estimation de la résistance au cisaillement cyclique non drainée

τ_{rc} à Partir de l'essai in situ SPT :

Après faire tout les corrections précité, on entame le calcul se CRR par plusieurs formules établies par les chercheurs : (Fernandes et al, 2014)

I.4.2.1 Méthode de Toshio Iwasaki et al. (1984) :

Le CRR peut être simplement évalué selon de nombreux résultats d'essai de cisaillement cycliques non drainé:

$$CRR = 0.225 \log_{10} \frac{0.35}{D_{50}} + 0.0882 \cdot \sqrt{(N / (\sigma'_v + 0.7))} \quad 0,04\text{mm} \leq D_{50} \leq 0,6\text{mm} \quad (\text{I.21})$$

$$CRR = -0.05 + 0.0882 \cdot \sqrt{(N / (\sigma'_v + 0.7))} \quad 0,6\text{mm} \leq D_{50} \leq 1,5\text{mm} \quad (\text{I.22})$$

Où

- ✓ N : le nombre de coups de la pénétration standard
- ✓ σ'_v : la contrainte effective (en kgf/cm)
- ✓ D_{50} : le diamètre moyen de particules (en mm)

I.4.2.2 Méthode de Youd et al. (2001)

La corrélation entre le rapport de résistance cyclique (CRR) ajusté à une magnitude $M=7.5$ et une contrainte $\sigma'_v = 1 \text{ atm}$ et la valeur de l'équivalent de sable propre $(N_{1.60cs})$ pour les sols pulvérulents, peut être déterminée à l'aide de l'expression suivante (Youd et al. 2001) :

$$CSR_{M=7,5} = \frac{1}{34 - (N_{1.60cs})} + \frac{(N_{1.60cs})}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (N_{1.60cs}) + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (\text{I.23})$$

Cette équation reste valable pour $FC < 5\%$ (sables propres), et $(N)_{1.60} < 30$.
Pour $(N)_{1.60} > 30$ on admit directement que le sol est non liquéfiable.

I.5.2.3 Méthode d'Andrus et al. (2004) :

Andrus et al. (2004) ont proposé l'équation suivant pour le CRR, par l'utilisation de nouvelle courbe de CRR en fonction de $(N)_{1.60cs} N_{1.60}$ (Figure I.11) :

$$CRR_{7.5} = 0.017 [(N_{1.60cs})]^{0.506} + 2.8 \left(\frac{M_w}{215 - 87.7((N_{1.60cs})^{2.53})} \right)^{-1/215} \quad (\text{I.24})$$

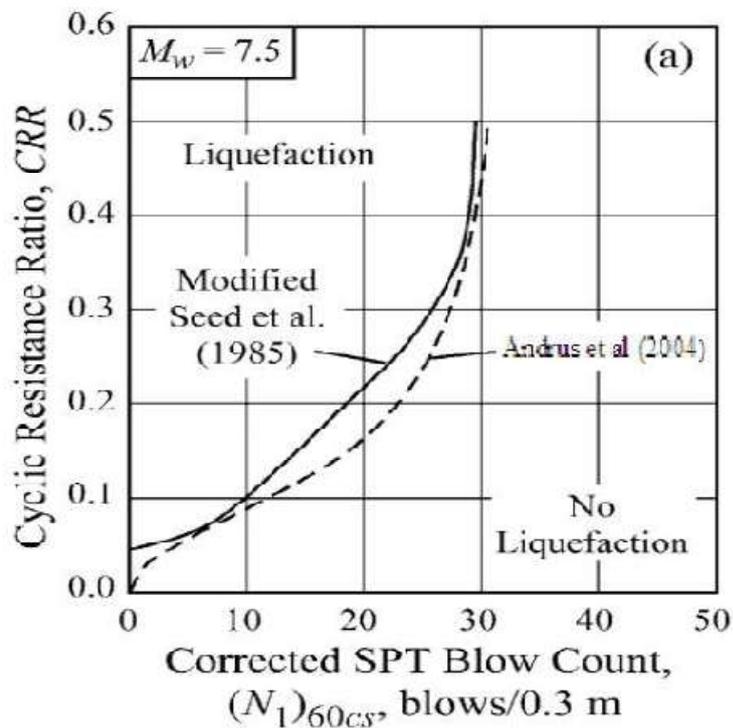


Figure I.11 : Courbe simplifiée pour le calcul du CRR pour $M_w=7.5$ (d'après Andrus et al, 2004)

I.4.2.3. Méthode d'Idriss et Boulanger (2006) :

Idriss et Boulanger (2006) ont recommandé l'équation analytique suivante à employer pour déterminer le CRR basé sur des résultats de SPT (Figure I.12), pour un sol non cohésion avec n'importe quel contenu fin (FC) :

$$CRR_{M=7,5 \text{ } \sigma'_{v=1atm}} = \exp \left[\left(\frac{(N_1)_{60.cs}}{14,1} + \left(\frac{(N_1)_{60.cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60.cs}}{23,6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60.cs}}{25,4} \right)^4 - 2,8 \right] \quad (I.25)$$

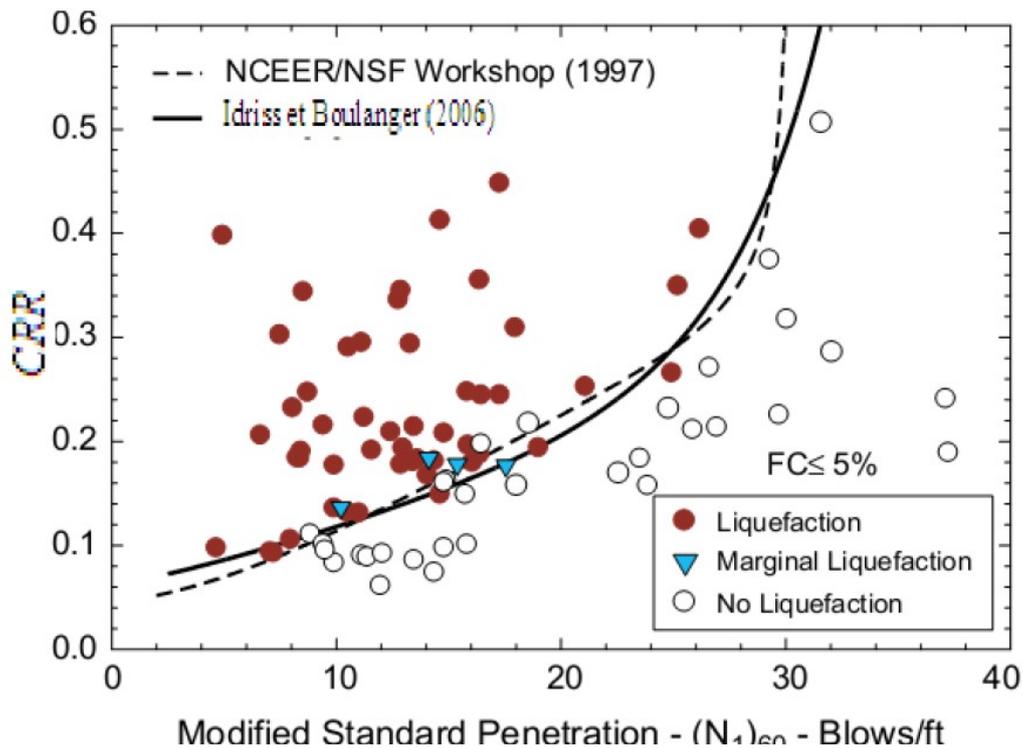


Figure I.12 : Courbe simplifiée pour le calcul du CRR pour Mw=7.5 (d’après Idriss et Boulanger 2006)

I.4.3. Evaluation du CRR par l’essai CPT :

L’essai CPT est généralement considéré un plus conformé et essai in situ qu’on peut répéter que SPT (Lunne et al, 1997) (cité par, Gutierrez et al 2003), et à la différence de SPT, il peut fournir un profil de sol presque continu. Plusieurs corrélations ont été proposées pour estimer CRR pour le sable propre et le sable limoneux à partir d’une résistance de pointe corrigée d’un essai CPT. (Yazdi et al, 2012).

I.4.3.1. Méthode de Robertson et Wride (1998) :

Dans la méthode de Robertson, CRR est calculé comme suit :

$$CRR = \begin{cases} 0.833 \left(\frac{q_{c1N,cs}}{100} \right) + 0.05 & \text{pour } q_{c1N,cs} < 50 \\ 93 \left(\frac{q_{c1N,cs}}{100} \right)^3 + 0.08 & \text{pour } 50 \leq q_{c1N,cs} < 160 \end{cases} \quad (I-26)$$

Le calcul de la résistance de pénétration du CPT normalisée équivalente d’un sable propre :

$(q_{c1N})_{cs}$ à partir de l’équation suivante :

$$(q_{c1N}) = K_c \times q_{c1N} \quad (I-27)$$

Où

- ✓ K_c : un facteur de correction qui est fonction des caractéristiques des particules du sol.
- ✓ q_{cIN} : La résistance de pointe corrigée

$$\begin{cases} K_c = 1 & \text{pour } I_c \leq 1.64 \\ K_c = -0.403I_c^4 + 5.58I_c^3 + 33.75I_c - 17.88 & \text{pour } I_c > 1.64 \end{cases} \quad (I.28)$$

Avec

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5} \quad (I.29)$$

$$Q = \left[\frac{(q_c - \sigma_{v0})}{P_a} \right] \left(\frac{P_a}{\sigma_{v0}} \right)^n \quad (I.30)$$

$$F = \left[\frac{f_s}{(q_c - \sigma_{v0})} \right] \times 100\% \quad (I.26) \quad (I.31)$$

I.5. Facteur de sécurité :

Q

Le facteur de sécurité (FS) par rapport à la liquéfaction est fonction des différents paramètres abordés ci-dessus. Il s'exprime de la façon suivante (Youd et al. 2001) :

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (I.32)$$

Une valeur de FS supérieure à l'unité indiquerait que le sol n'est pas susceptible à la liquéfaction. Lorsque FS est inférieur à 1, plus la valeur est faible, plus le risque sera important.

Lorsqu'il est très proche de l'unité, la génération des pressions interstitielles sera importante lors d'un séisme mais les risques peuvent être limités et la liquéfaction peut ne pas se développer. Cette situation impose la réalisation d'études plus poussées pour permettre d'identifier les risques avérés.

I.6. Conclusion :

La liquéfaction étant l'une des conséquences d'un séisme, son étude s'avère d'une importance majeure. Dès lors, plusieurs méthodes ont été développées afin d'évaluer la résistance des sols à la liquéfaction.

Ces méthodes qui se reposent sur le calcul d'un facteur de sécurité (rapport de CRR sur CSR) supposent en général des conditions de saturation et de l'état lâche du sol, certaines limitations imposent des incertitudes sur leur utilisation. Par exemple le cas du non saturation n'est pas intégré dans le calcul. Réellement il y'a plusieurs facteurs qu'on doit prendre en cause et qui imposent des corrections sur le facteur de sécurité (FS), pour cela on doit faire des corrections par l'introduction des facteurs correcteurs pour bien prendre en considération l'état initiale de massif de sol et se rapproché plus en plus de la réalité.

CHAPITRE II : LA GEOSTATISTIQUE:

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter un aperçu sur la géostatistique, ainsi que les paramètres d'une analyse géostatistique.

II.2. L'histoire de la géostatistique:

Le néologisme "géostatistique" a été inventé par Georges Matheron en 1962.

Le préfixe "géo" fait référence au domaine des sciences de la terre, qui est historiquement celui où la géostatistique est développée. Les champs d'application actuels concernent des domaines très variés (géologie minière, hydrogéologie, climatologie, sciences sociales,... etc.). La désinence "statistique" se réfère à l'utilisation de méthodes probabilistes.

L'originalité de la géostatistique par rapport à la statistique classique est la prise en compte de la dépendance entre les observations lorsque celles-ci sont situées dans l'espace. (Gilles Guillot 2004)

L'avenir de la géostatistique semble brillant. Avec toutes les expériences et les développements des trente dernières années.

II.3. Définition de la géostatistique:

La géostatistique est l'étude des variables régionalisées, à la frontière entre les mathématiques et les sciences de la Terre. Son principal domaine d'utilisation a historiquement été l'estimation des gisements miniers, mais son domaine d'application actuel est beaucoup plus large et tout phénomène spatialisé peut être étudié en utilisant la géostatistique.

MATHERON (1971) définit la géostatistique de la façon suivante : "la géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels". (MATHERON 1971).

II.4. Domaines d'application de la géostatistique:

La géostatistique est utilisée dans plusieurs domaines parmi lesquels:

- L'environnement
 - Etude des Sites et Sols pollués (pollution métallique ou organique) ;
 - Etude des hétérogénéités des sites ;
 - Etude de la caractérisation de sols pollués dans le cadre de sites présentant un échantillonnage suffisamment dense.

- Estimation des champs de perméabilité
 - Estimation de la charge et de la transmissivité avec prise en compte des conditions aux limites dans la modélisation. Simulations géostatistiques de la perméabilité et autres ;
 - L'interpolation de la charge est effectuée par la méthode dite de krigeage.

- La Géotechnique
 - Etude de la quantification par simulation des incertitudes sur le comportement de gros ouvrages et Simulation géostatistique de paramètres géotechniques.

- L'agronomie
 - Estimation et cartographie de la pluviométrie, application à la classification de sols, composition granulométrique, chimique,... des sols.

- La modélisation démographique
 - Géostatistique sur les données de recensement.

- Le pétrole
 - Modélisation géométrique: elle consiste à interpoler les surfaces servant de limites ou de surface de référence pour les unités en tenant compte de toutes les informations disponibles: cotes des toits mesurées aux puits, données de pendage et d'orientation et contraintes d'inégalités, facteurs de forme donnés par les couvertures sismiques. L'interpolation de ces surfaces géologiques doit pouvoir utiliser les données provenant de sondages déviés (ou horizontaux) et prendre en compte la structure géologique.

- Caractérisation de réservoir : Elaborer des méthodes de simulations conditionnelles des variables pétro physiques (porosité, perméabilité) en accord avec la géologie.
- La santé
- En épidémiologie et hygiène industrielle.

II.5. Le semi-variogramme:

Le semi-variogramme est un outil servant à décrire la continuité spatiale d'un phénomène.

Il repose sur l'idée que deux observations séparées par une faible distance, se ressemblent davantage en moyenne que deux observations séparées par une plus grande distance.(Gilles Guillot 2004).

Il existe deux types de semi-variogramme :

- Le semi-variogramme théorique .
- Le semi-variogramme expérimental.

Soit deux variables aléatoires, $Z(x)$ et $Z(x+h)$ mesurées en 2 points " x " et " $x+h$ ", la variabilité entre ces deux points se caractérise par une fonction notée $2\gamma(x, h)$ appelée variogramme.

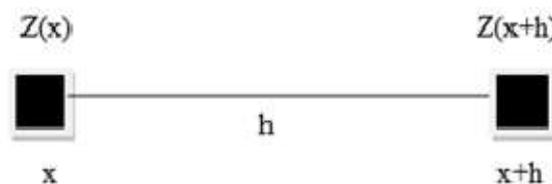


Figure II.01:Représentation schématique des points de mesure de la variable.

II.5.1. Le semi-variogramme théorique:

Soit Z variable considérée distribuée dans un domaine 1D (dimension), 2D ou 3D. La formulation théorique du semi-variogramme $\gamma_{th}(h)$ fait appel à la notion de variance (Var) appliquée à la différence entre deux observations $Z(x)$ et $Z(x+h)$ séparées par une distance h .

Ce qui donne le semi-variogramme théorique, pour tout x dans G :

$$\gamma_{th}(h)=0,5\text{Var} [(Z(X)-Z(X+h))] \quad (\text{II.01})$$

On peut schématiser l'ensemble des modèles théoriques de semi-variogramme par le graphique de la (Figure II.3). Ce graphique met en avant trois paramètres fondamentaux : l'effet de pépité, le seuil, et la portée. Ces trois paramètres sont brièvement décrits ci-dessous.

II.5.1.1. L'Effet de pépité :

L'effet de pépité C_0 est défini par la valeur de semi-variogramme au voisinage de l'origine. C'est la limite de cette fonction quand h tend vers 0.

Il représente une discontinuité à l'origine qui est expliquée par d'éventuelles erreurs de mesure ou par la présence d'une microstructure d'une portée plus faible que la maille d'échantillonnage utilisée.

II.5.1.2. La portée :

Dans l'étude de la variabilité spatiale, il est important d'examiner le comportement du semi-variogramme à grande distance. La fonction semi-variogramme peut atteindre une limite à partir d'une certaine distance appelée portée (a). A partir de cette distance il n'y a plus de corrélation spatiale entre les données.

Cette limite est nommée palier et désigne la variance totale $C(0)$. Dans la pratique, la portée est définie par la distance à laquelle le semi-variogramme atteint 95% de la valeur de son palier.

II.5.1.3. Le seuil ou palier :

On appelle seuil du semi-variogramme sa valeur limite pour de grandes valeurs de h . Ce paramètre suscite un intérêt très important dans l'analyse de la régularité des variations locales. En effet, si le seuil d'un semi-variogramme est infini, alors le processus des variations locales n'est pas stationnaire. (Aloui T)

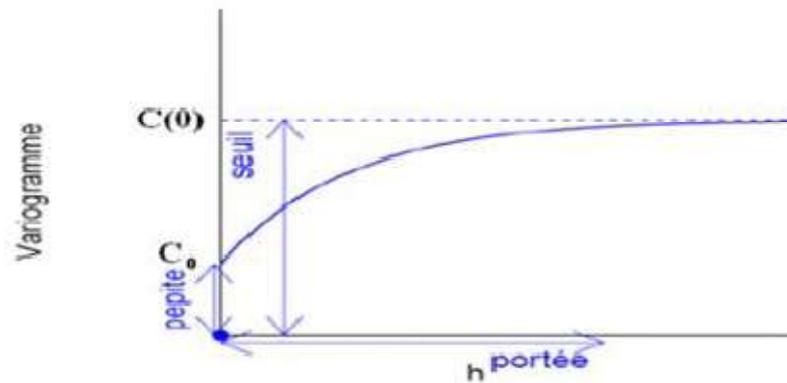


Figure II.2: Schéma type d'un variogramme.

II.5.2. Le semi-variogramme expérimental (γ_e):

Dans la pratique, il n'est pas possible de calculer le variogramme théorique tel qu'il est décrit, car on ne dispose que des échantillons. Pour l'approcher, une expression du semi-variogramme expérimental est plus pratique.

Le semi-variogramme permet de mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée $z(x)$, en calculant la différence entre deux échantillons z_1 et z_2 situés en deux points x_1 et x_2 d'un domaine spatial. Cette différence notée γ_e s'écrit :

$$\gamma_e = (Z_2 - Z_1) / 2 \quad (\text{II.02})$$

Pour voir si l'azimut décrit par les deux points considérés a un effet quelconque, on fait dépendre γ_e de la distance et de l'orientation de la paire de points.

$$\gamma_e = 1/2 (Z(X) - Z(X+h))^2 \quad (\text{II.03})$$

En formant la moyenne des dissemblances γ_e entre les valeurs pour toutes les $N(h)$ paires de points reliées par un vecteur h donné pour une maille donnée, on obtient la notion de semi-variogramme expérimental.

$$\gamma(h) = [1/(2N(h))] \sum_i^{N(h)} [(Z(X) - Z(X + h))^2] \quad (\text{II.04})$$

Où : $N(h)$ représente le nombre de paires d'observations séparées par la distance h .

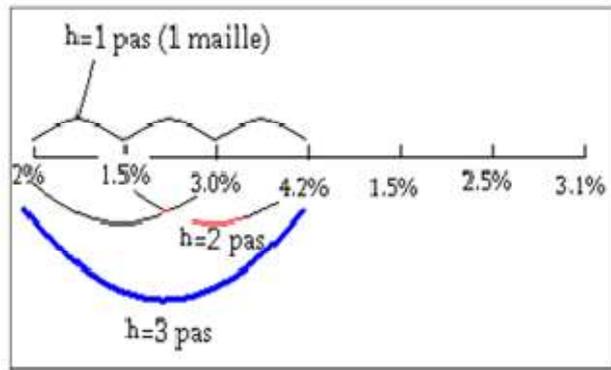


Figure II.3 : Schéma de calcul du variogramme expérimental.

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques à l'aide d'une expression particulière du variogramme :

$$\gamma(h, \theta) = [1/(2N(h, \theta))] \sum_i^{N(h, \theta)} [(Z(X) - Z(X + h))^2] \quad (II.05)$$

Où $N(h, \theta)$: est le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ .

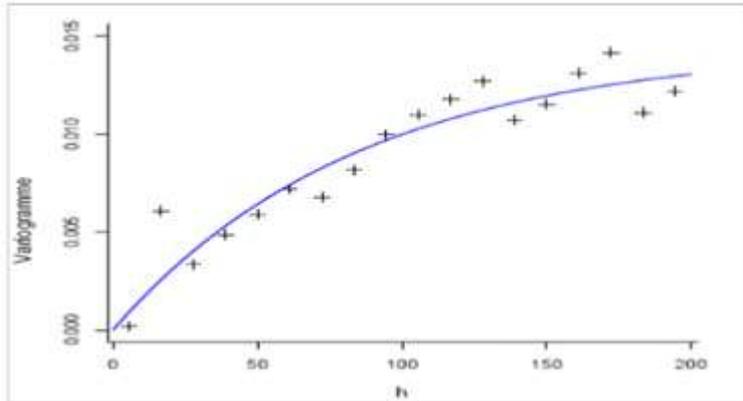


Figure II.4: Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental (croix).

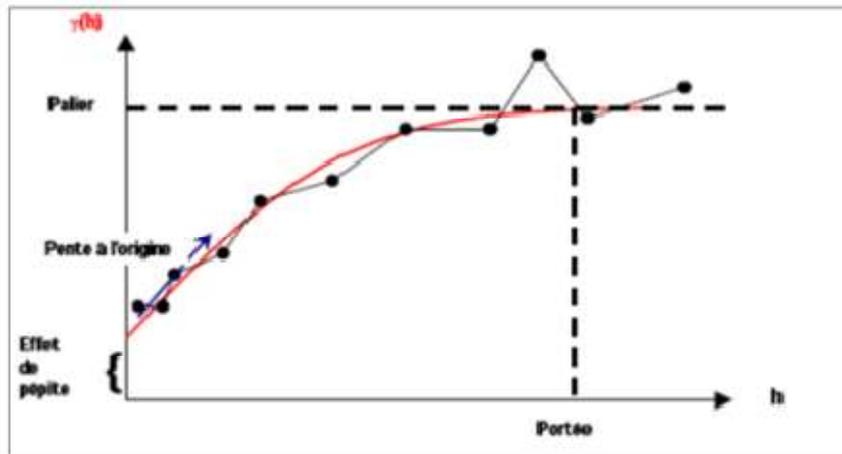


Figure II.5: Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement.

II.6. Modèles théoriques de variogramme:

Une fois que le semi-variogramme expérimental a été construit, on passe à l'adaptation du modèle théorique de semi-variogramme aux points obtenus en optimisant le modèle par contre vérification.

Le semi-variogramme théorique est recherché par modélisations en utilisant une fonction connue de la nuée variographique. L'objectif est de trouver la courbe théorique qui s'adapte le mieux à la courbe expérimentale.

Les principaux modèles admissibles sont l'effet de pépité, le modèle linéaire, le modèle sphérique, le modèle puissance, le modèle gaussien et le modèle exponentiel. Une combinaison de deux de ces modèles ou plus est également faisable.

II.6.1. L'effet de pépité:

La situation de plus forte irrégularité des variations locales correspond à une absence de dépendances entre des mesures effectuées en des sites différents, ce qui se traduit par l'effet de pépité :

Pour tout $h \neq 0$; $C(h) = 0, \gamma(h) = C(0)$.

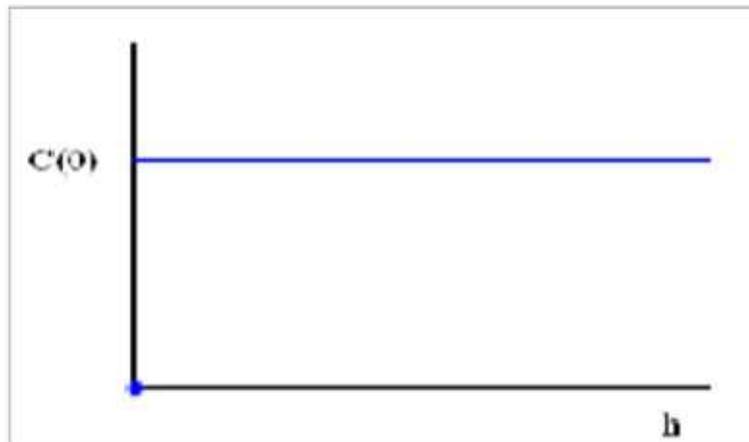


Figure II.6: Semi-variogramme forte irrégularité (pépité pure).

Inversement, la situation théorique de plus grande régularité correspond à des dépendances locales maximales :

Pour tout $h \neq 0$; $C(h) = C(0), \gamma(h) = 0$.



Figure II.7: Semi-variogramme grande régularité (pépite pure).

Entre ces deux situations extrêmes, la régularité du processus des variations locales se mesure à la régularité fonctionnelle du semi-variogramme de ce processus au voisinage de 0.

Lorsque le semi-variogramme atteint une limite, on s'intéresse à la valeur de h pour laquelle cette limite est atteinte. En effet, cette valeur, qu'on appelle la portée des variations locales, caractérise l'écart entre les sites de mesures au-delà desquels les dépendances entre les mesures du processus sont nulles.

Les trois modèles suivants constituent trois exemples très classiques de semi-variogramme pour des processus stationnaires se différenciant par leur régularité au voisinage de 0.

II.6.2. Le modèle exponentiel :

L'expression générale du modèle exponentiel s'écrit :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 [1 - \exp(-h/a)] \quad (\text{II.06})$$

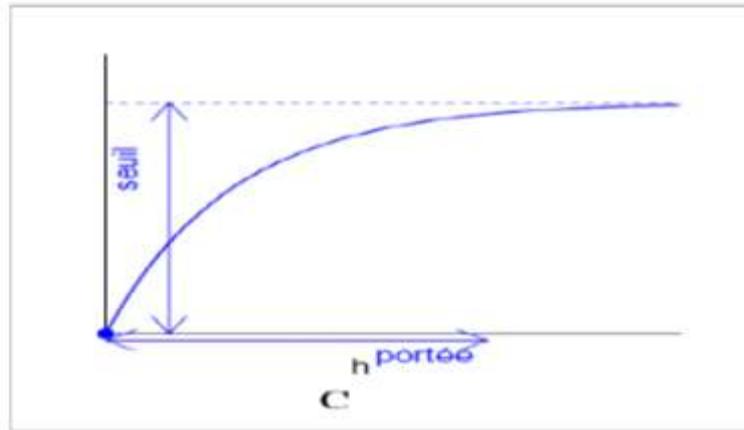


Figure II.8: Type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel.

II.6.3 Le modèle Gaussien :

L'expression générale du modèle Gaussien s'écrit :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 [1 - \exp(-h^2/a^2)] \quad (\text{II.07})$$

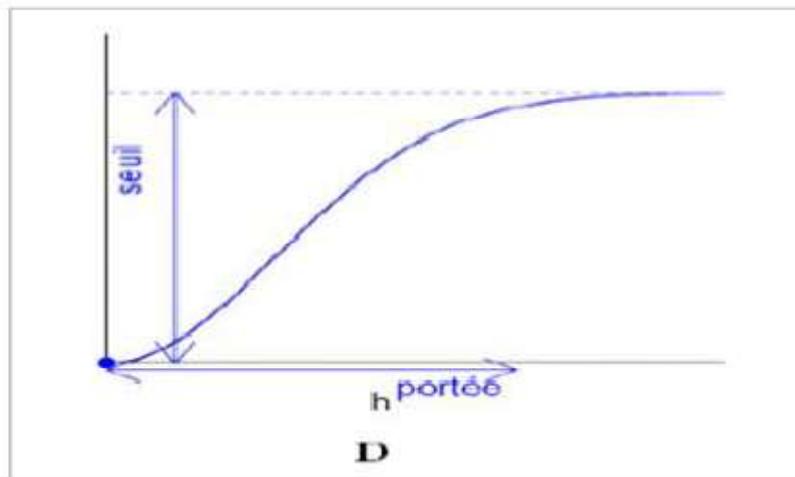


Figure II.9: Type d'un modèle de semi-variogramme Gaussien.

II.6.4 Le modèle sphérique :

L'expression générale du modèle sphérique (le plus utilisé) s'écrit :

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & 0 \leq h \leq a \\ c_0 + c & h > a \end{cases} \quad (\text{II.09})$$

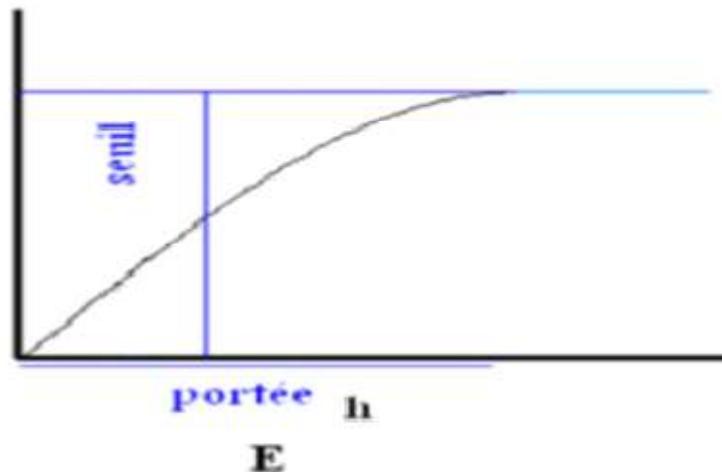


Figure II.10: Type d'un modèle de semi-variogramme sphérique.

II.7. Conclusion :

La géostatistique est utilisée pour décrire les variations des propriétés du sol avec la profondeur, pour évaluer et simuler la profondeur de la première couche résistante et pour établir un profil transversal du sol et même pour prévoir toute éventuelles zones qui peuvent présenter des risques sur nos ouvrages (liquéfaction ,tassements , gonflements...ext).

On conclut que ces techniques sont d'une grande utilité et qu'elles seront certainement utilisées de façon de plus en plus systématique dans le futur.

CHAPITRE III: EVALUATION DE COEFFICIENT DE SECURITE

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, une approche géostatistique simplifiée a été adoptée pour estimer le coefficient de sécurité de l'hétérogénéité lithologique des propriétés du sol sur la réponse induite par le tremblement de terre sur le site de l'aéroport d'Alger.

Les résultats de l'essai de pénétration du cône (CPT), ont été utilisés pour identifier les différentes lithologies, pour lesquels ont été estimés les propriétés du sol.

III.2. Présentation du site:

Dans le cadre de la construction d'une nouvelle aérogare et d'une gare de fret dans l'aéroport international d'Alger, une expertise du sous-sol et des fondations a été réalisée en 1983. Le site étudié (Aéroport d'Alger) se situe à environ 20 km au sud-est de la ville d'Alger, soit dans la grande plaine côtière, « Plaine de la Mitidja », qui s'étend entre les montagnes de l'Atlas tellien et la méditerranée. La figure suivante (Figure III.1) donne un aperçu de la situation de l'aéroport. (Natacha Cadoux, 1996).



Figure III. 1 : Localisation de l'aéroport d'Alger(Benahchilif 2016).

La plaine de la Mitidja est sillonnée par cinq principaux oueds issus de l'Atlas et assurant son drainage vers le Nord avec un sens d'écoulement général Sud Ouest-Sud Est. Le

principal cours d'eau intéressant le site est l'Oued Smar qui recevait à l'origine deux affluents : l'Oued Boutrick et l'Oued Saïd. Ses eaux ont été déviées au Sud et à l'Ouest de l'aéroport pour permettre la construction des pistes. La figure (III.2) représente le réseau hydrographique de la région.



Figure III. 2 : Réseau hydrographique de la plaine de la Mitidja (Benahchilif 2016).

III.3. Caractérisation du sol:

III.3.1. Constitution du sol :

III.3.1.1. Nature du sol :

Sous une couche de terre végétale ou sous une couche de terrain remblayé atteignant une épaisseur de 0,3 m à 1,5 m, se trouve dans la partie sud du terrain, une série de couches d'argile grise jusqu'à 19 m voire même 22 m de profondeur. Ces couches sont en alternance mi-consistante ou consistante jusqu'à très consistantes.

Jusqu'à une profondeur de 16 m à 19 m, parfois même 22 m, ces couches d'argiles ont interrompues par des couches de graviers, de galets et de sable qui sont au moins moyennement denses.

Sous ces couches géologiquement jeunes d'argiles grise, à partir d'une profondeur de 19 m à 22 m et ce jusqu'à une très grande profondeur, se trouve une couche apparemment beaucoup plus anciennes d'argile jaunâtre et tachetée. Cette couche est très consistante ou même très dure.

Au nord du terrain, la couche jaunâtre d'argile monte peu à peu pour atteindre le niveau du terrain. Sa résistance diminue quelque peu.

Les intercalations de sable ou de gravier sont rares jusqu'à une profondeur de 16 m mais elles deviennent plus fréquentes entre 16 m et 20 m. Elles sont toutefois très irrégulières aussi bien horizontalement que verticalement et sont toutefois très irrégulières aussi bien horizontalement que verticalement et sont très fréquemment interrompues par de l'argile mi consistante si bien que le pouvoir porteur du sol ne semble pas surtout idéal. Par ailleurs, il existe aussi des couches de gravier et de sable de faible résistance dans l'argile jaunâtre et ce jusqu'à une profondeur atteignant entre 20 m et 40 m.

De plus, les couches d'argile grise comportent à plusieurs endroits de fortes couches de boue organique qui peuvent s'étaler sur de très grandes distances. Le mélange des différentes couches donne donc, en général, une image très irrégulière (Benahchilif 2016).

III.3.1.2. Nappe phréatique :

En ce qui concerne le comportement de la nappe phréatique sous le terrain de l'aéroport, il est fait mention, dans tous les documents à notre disposition, d'importantes variations du niveau de la nappe allant jusqu'à 5 m en fonction des saisons. Il est conseillé de considérer par conséquent que la nappe phréatique est affleurante.

III.3.1.3. Caractéristiques mécaniques :

Il ressort de la synthèse des différents essais en place et plus particulièrement des pénétrogrammes que les sols en place sont très hétérogènes du point de vue de leur résistance. Ainsi, en général, les couches suivantes apparaissent successivement :

- En surface, les sols présentent des résistances de pointes élevées témoignant de la présence des sols sur consolidés sujets aux variations de teneurs en eau (fluctuations de la nappe et évaporation). L'épaisseur moyenne est 2,3 m.
- Au dessous de cette couche de surface, on trouve des sols présentant des faibles résistances de pointe ($q_c < 1$ MPa) reflétant des argiles molles ou des vases.
- Au-dessous, on rencontre des sols très résistants avec des résistances de pointe élevées à très élevées ($q_c > 3$ MPa à $q_c > 10$ MPa) témoignant de la présence de sols pulvérulents.

On note que les couches de faible résistance sont parfois intercalées de couches résistantes. La reconnaissance géophysique a mis en évidence les mêmes couches au moyen des mesures de résistivité.

Enfin, les essais en laboratoire ont confirmé les résultats déjà obtenus. Les sols rencontrés sur neuf sondages différents sont, d'une manière générale, des sols : Fins ; De densité très variable (de peu denses à très denses) ; Proches de la saturation à la saturation Plastiques.

Sur-consolidés en surface et sous consolidés en profondeur ; Moyennement compressible.

III.4. Présentation des données :

III.4.1. Origine des données :

Les données que nous traiterons dans cette étude proviennent de sondages effectués avec un pénétromètre statique de type Gouda. Nous disposons d'un grand nombre de courbes pénétrométriques sur lesquelles sont représentées simultanément la résistance de pointe opposée par le sol à l'enfoncement de la pointe conique du pénétromètre et la force de frottement du sol sur la paroi latérale de la tête de mesure.

Etant donnée l'importance du nombre de sondages, nous nous limiterons aux 09 sondages.

L'implantation des essais au pénétromètre est donnée sur la figure (III.3). Pour chaque courbe pénétrométrique, nous avons relevé les valeurs de la résistance de pointe q_c et de la force de frottement latéral f_s tous les 01 m jusqu'à 20 m ou moins suivant le refus. Etant donnée la qualité médiocre de certains pénétrogrammes, des valeurs manquent parfois, à certaines profondeurs.

Les coordonnées d'implantation des sondages, quant à elles, ont été définies par rapport à un repère choisi de manière tout à fait subjective. On a procédé à un positionnement d'après la carte des implantations en adoptant une échelle a priori.

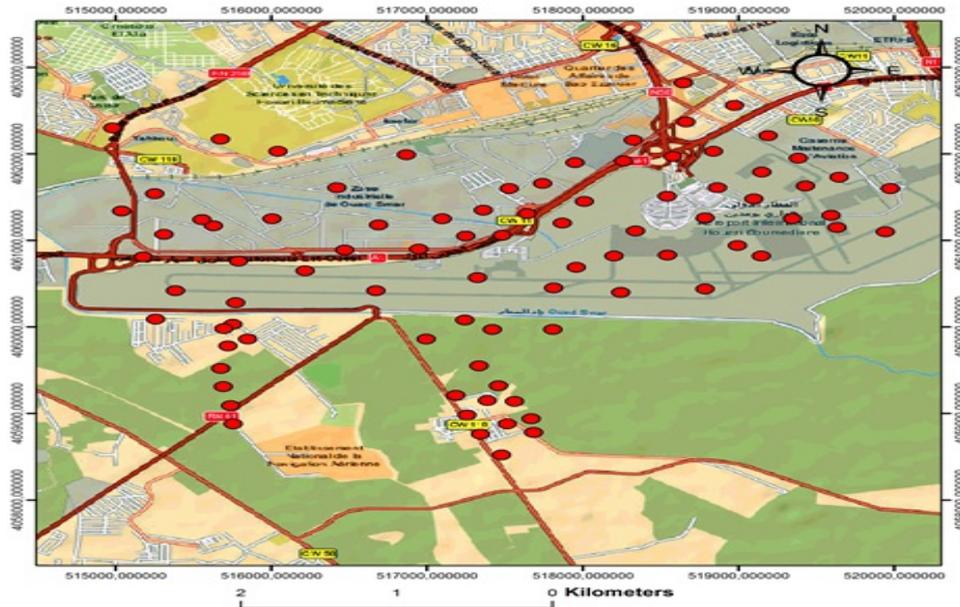


Figure III.3 Implantation des sondages

III.4.2. Présentation des tableaux de données :

Les tableaux suivants (voir annexes) présentent les données de la résistance de pointe pour les sondages de S01 à S 09 respectivement .

La figure III.4 montre un organigramme d'évaluation des contraintes et des déformations cyclique utilisé dans notre étude en se basant sur la méthode de Robertson et Wride 1998.

Les résultats de calcul seront présentés dans des tableaux récap (voir annexes).

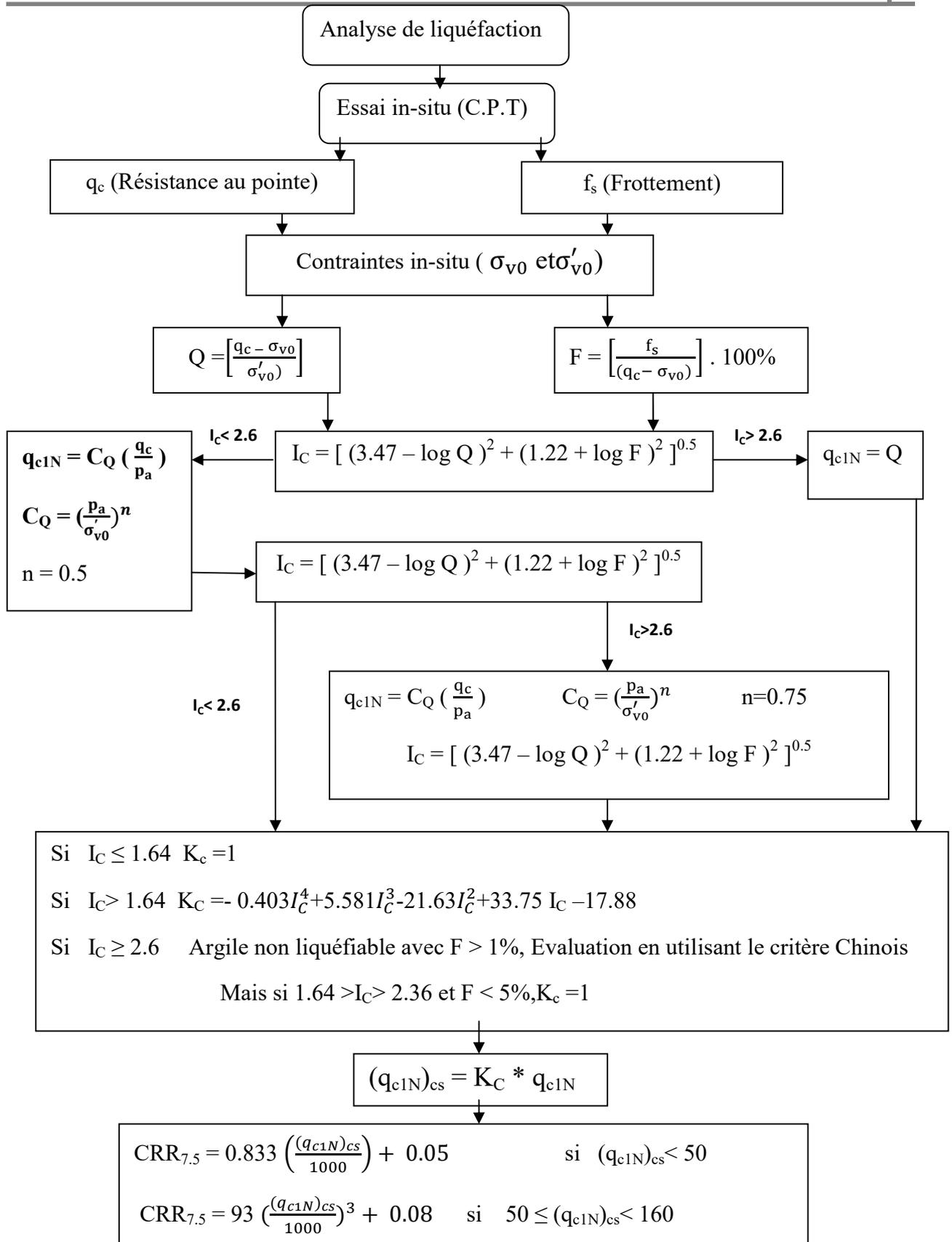


Figure III.4: Méthode de Robertson et Wride, 1998

III.4.2.5. Graphes et interprétation résultats de calcul:

La variation de la résistance de pointe, du coefficient de sécurité ainsi que la variation de contrainte et de résistance cyclique en profondeur sont montrés dans les figures suivantes pour les différents sondages.

Puisque le facteur de sécurité diminue, on peut conclure que ceci est due à la diminution du CRR, qui est due forcément à la diminution de la résistance pénétrométrique, car pour les sols qui ont des valeurs de q_c élevées, ils ne sont pas susceptibles d'être liquéfiables.

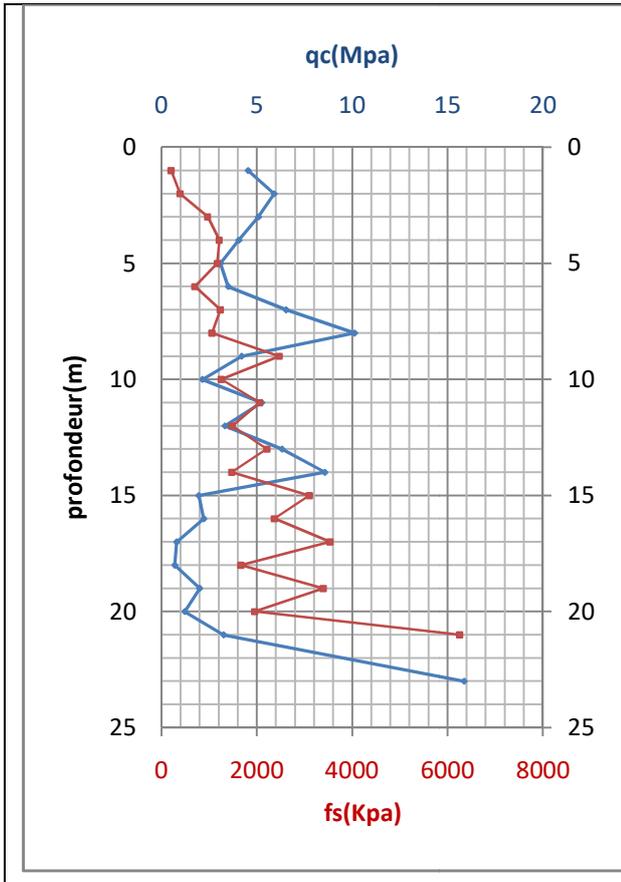


Figure III.05 : Variation F_s/q_c en fct de la profondeur du Sondage S 01

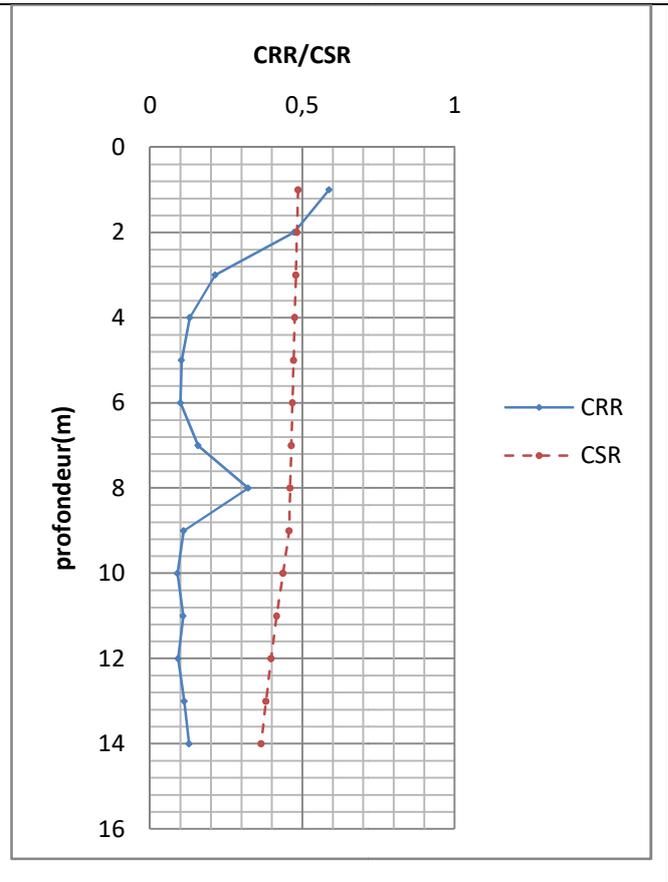


Figure III.06 : Variation CRR/CSR en fct de la profondeur du Sondage S 01

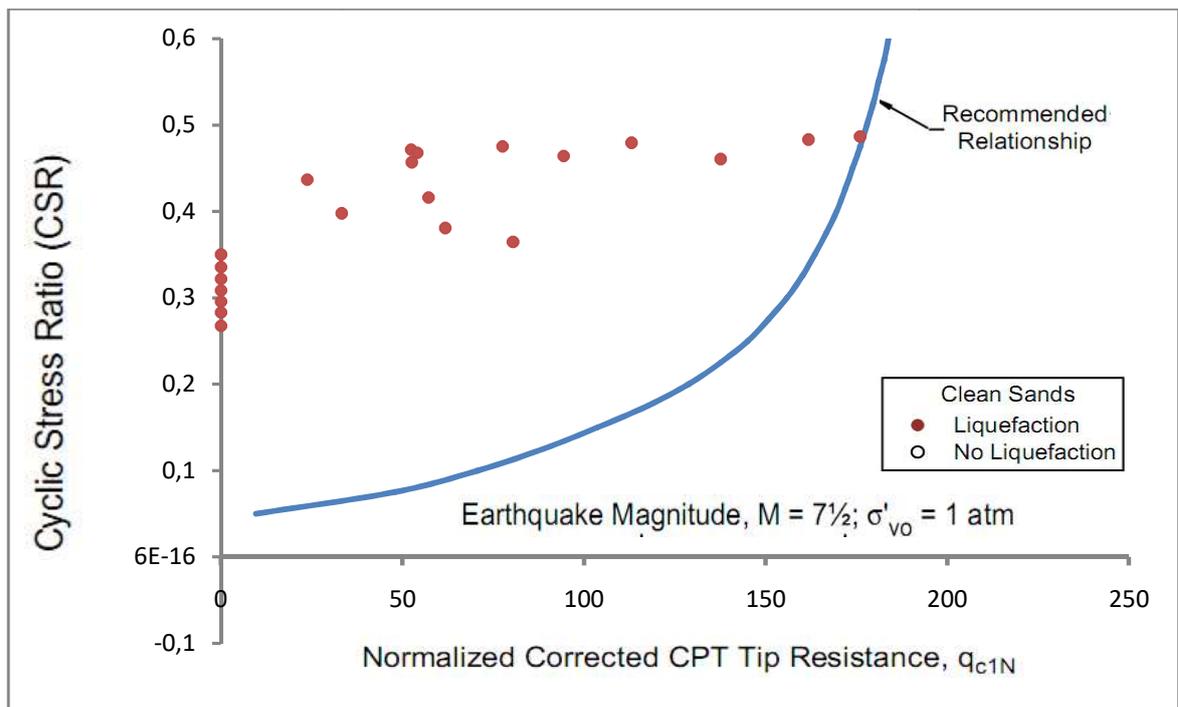


Figure III.7: Variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 01

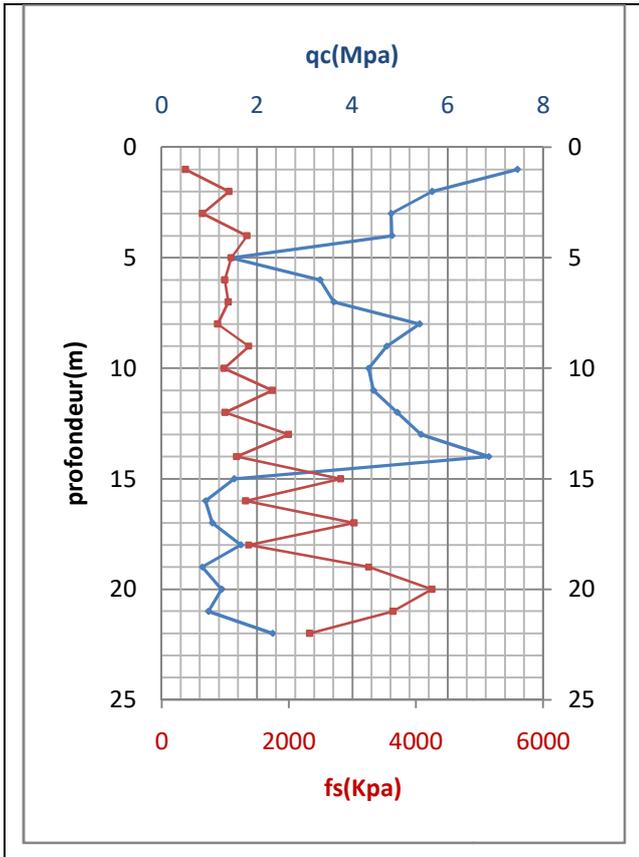


Figure III.8 : Variation f_s/q_c en fct de la profondeur du Sondage S 02

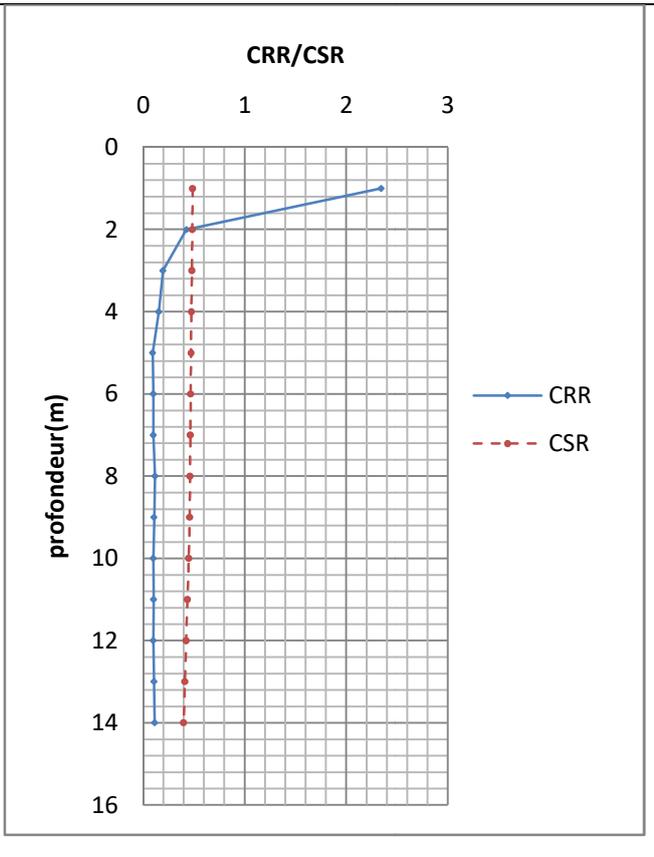


Figure III.9 : Variation CRR/CSR en fct de la profondeur du Sondage S 02

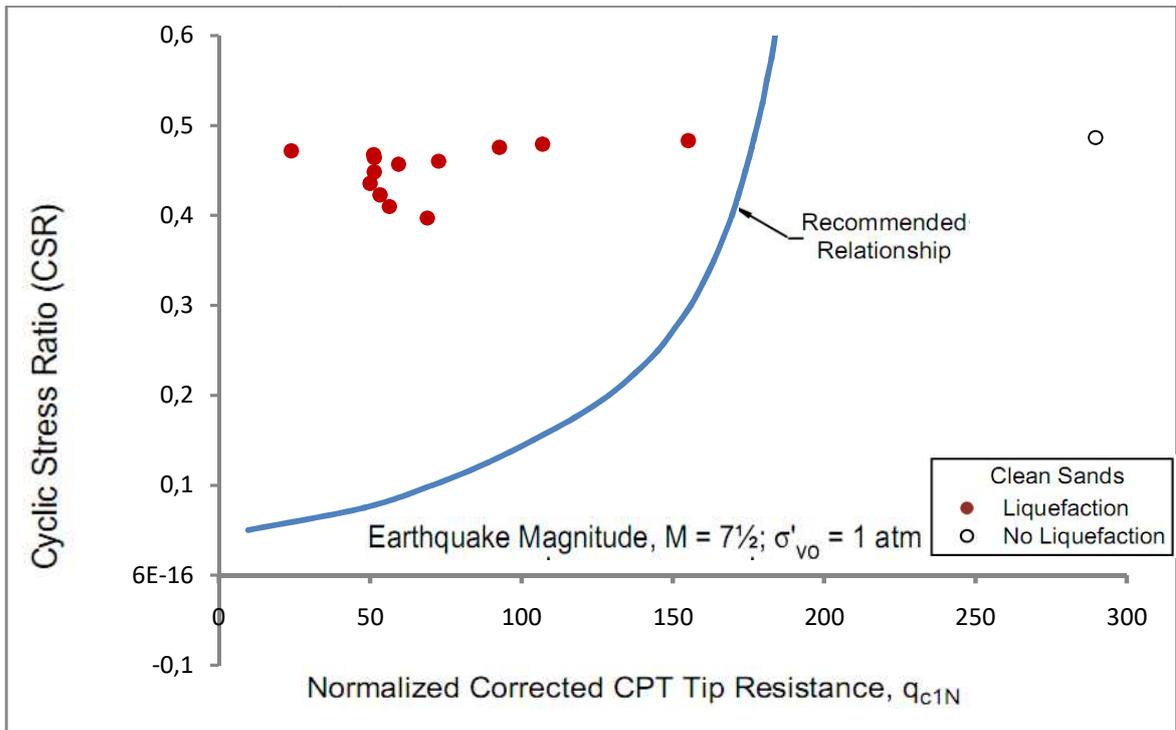


Figure III.10: Variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 02

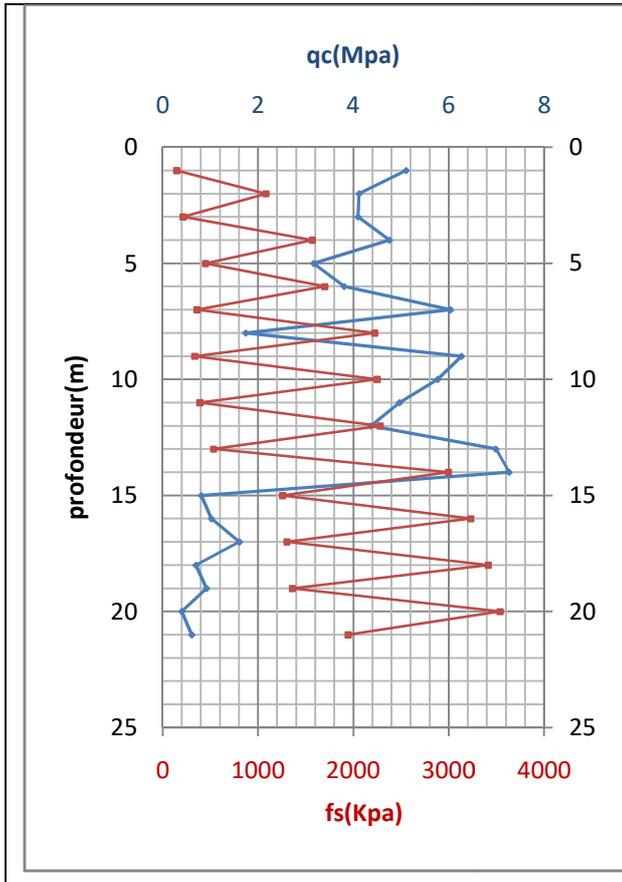


Figure III.11 : Variation F_s/q_c en fct de la profondeur du Sondage S 03

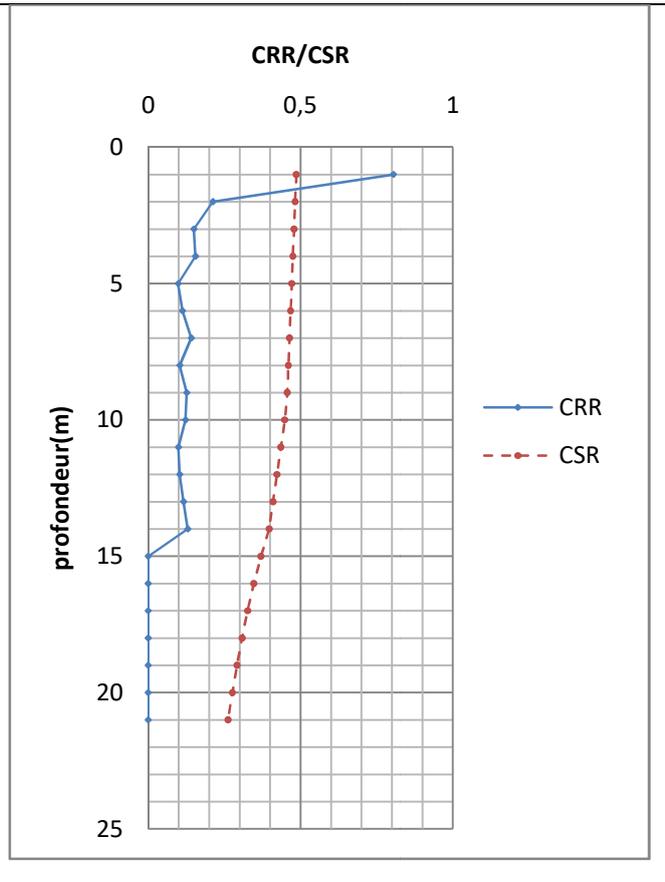


Figure III.12 : Variation CRR/CSR en fct de la profondeur du Sondage S 03

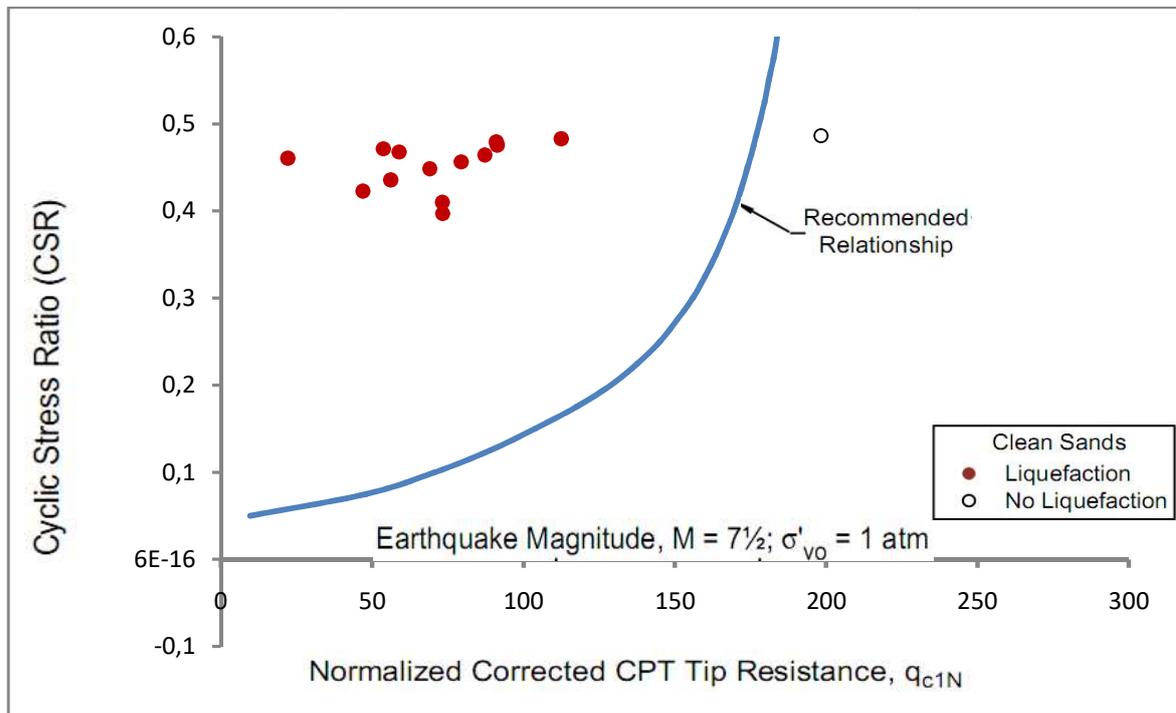


Figure III.13: Variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 03

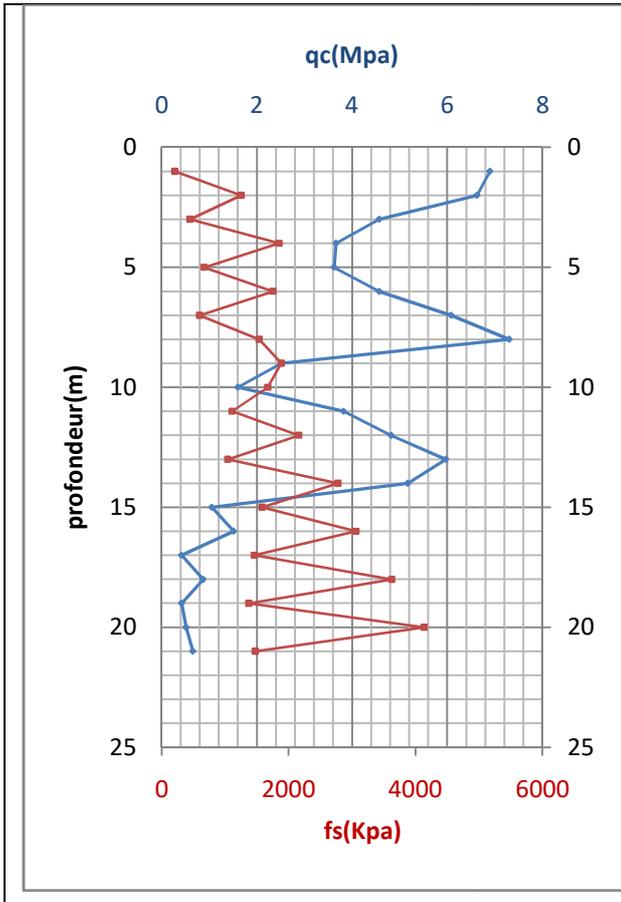


Figure III.14 : Variation fs/qc en fct de la profondeur du Sondage S 04

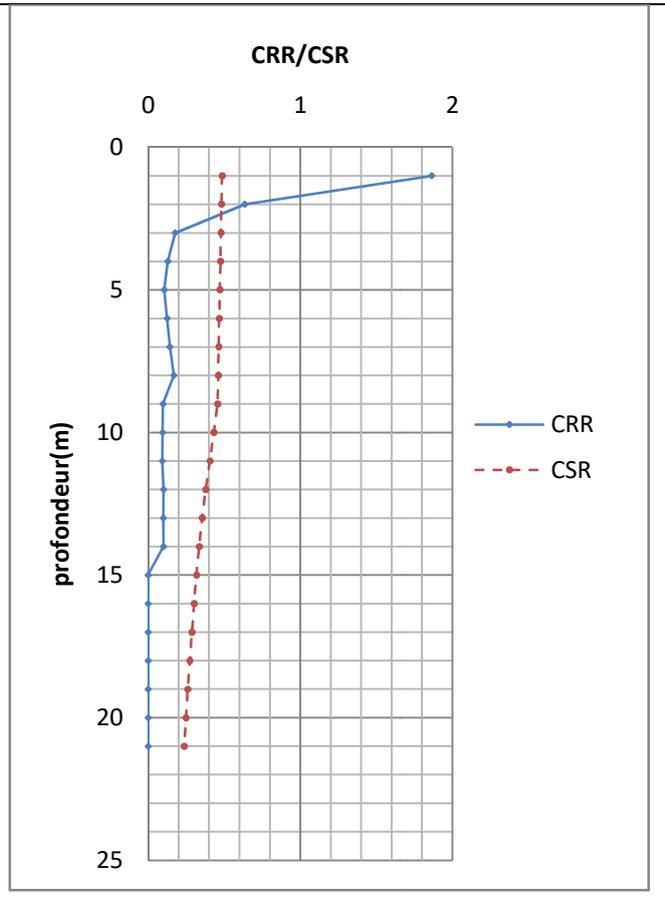


Figure III.15 : Variation CRR/CSR en fct de la

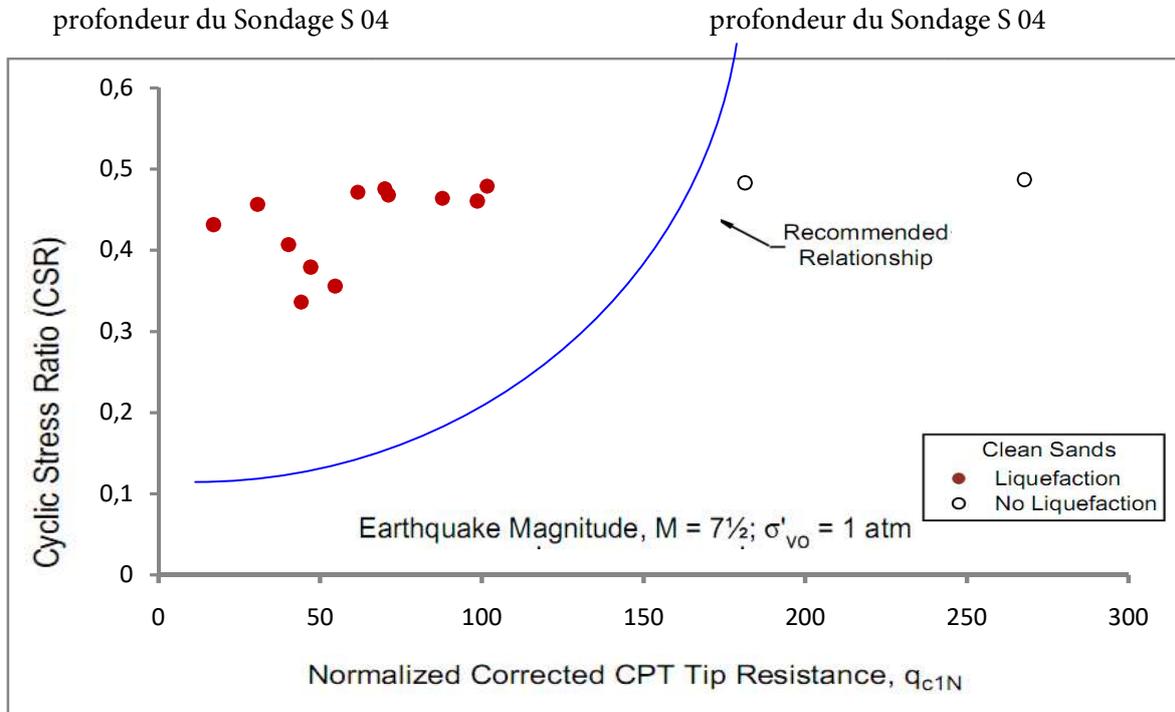


Figure III.16: Variation CSR en fonction q_{c1N} -Sondage S 04

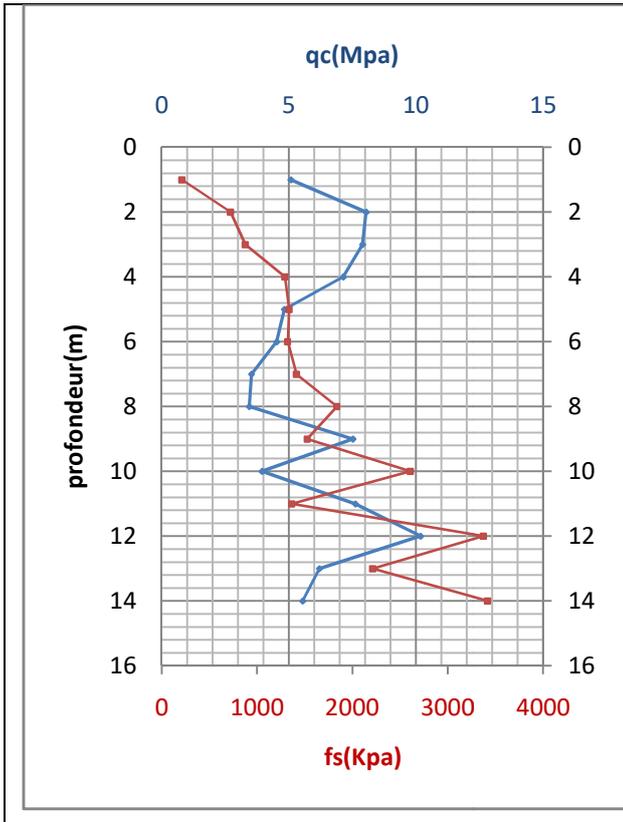


Figure III.17 : Variation F_s/q_c en fct de la profondeur du Sondage S 06

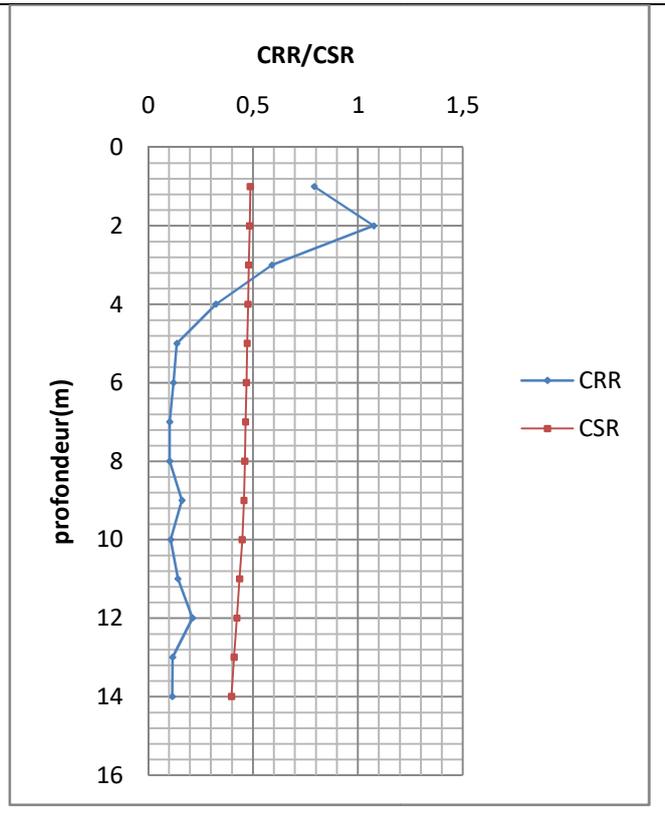


Figure III.18 : Variation CRR/CSR en fct de la profondeur du Sondage S 06

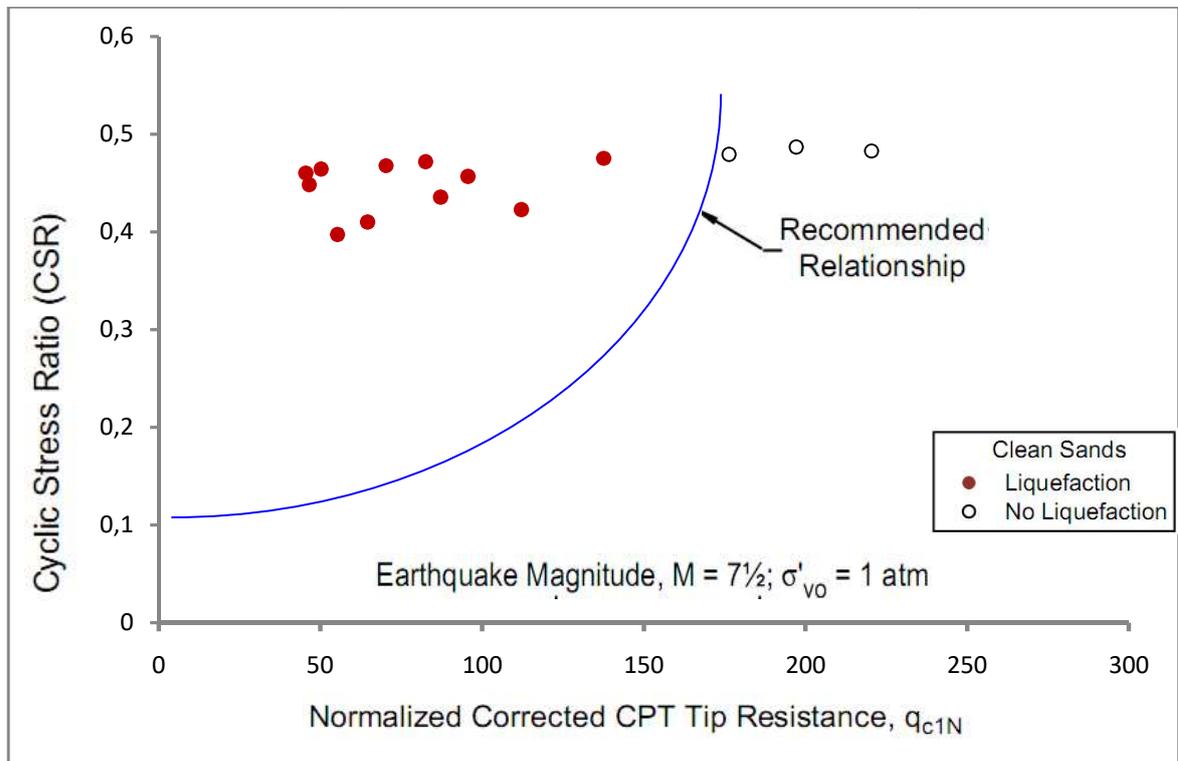


Figure III.19: Variation CSR en fonction q_{c1N} . Sondage S 06

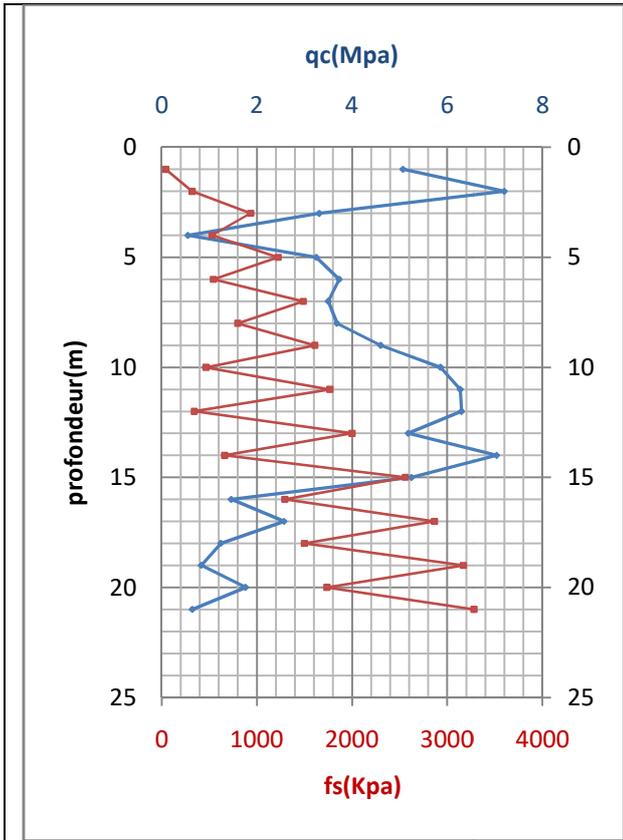


Figure III.20 : Variation F_s/q_c en fct de la profondeur du Sondage S 07

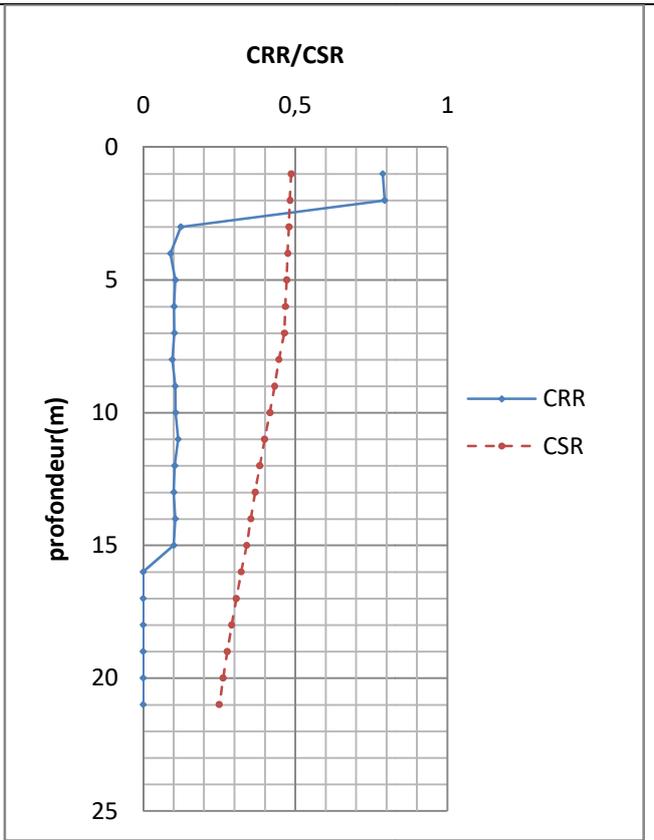


Figure III.21 : Variation CRR/CSR en fct de la profondeur du Sondage S 07

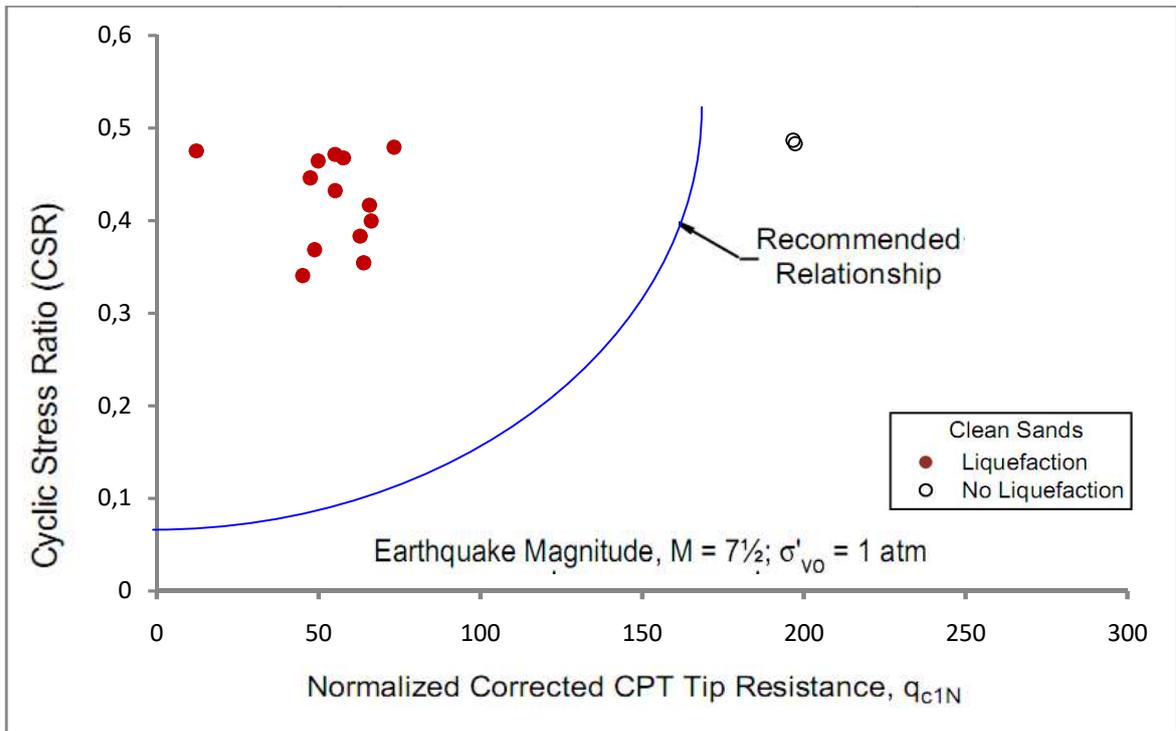


Figure III.22 : Variation CSR en fonction q_{c1N} . Sondage S 07

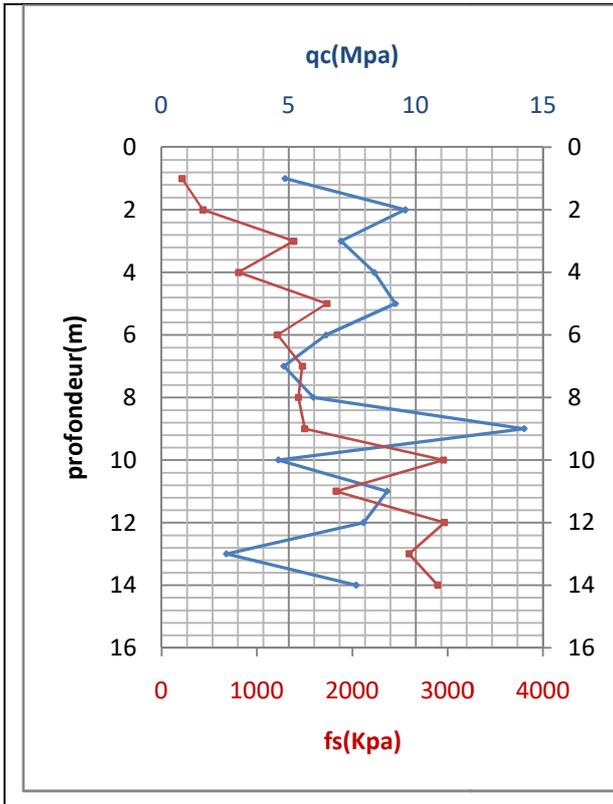


Figure III.23 : Variation f_s/q_c en fct de la profondeur du Sondage S 08

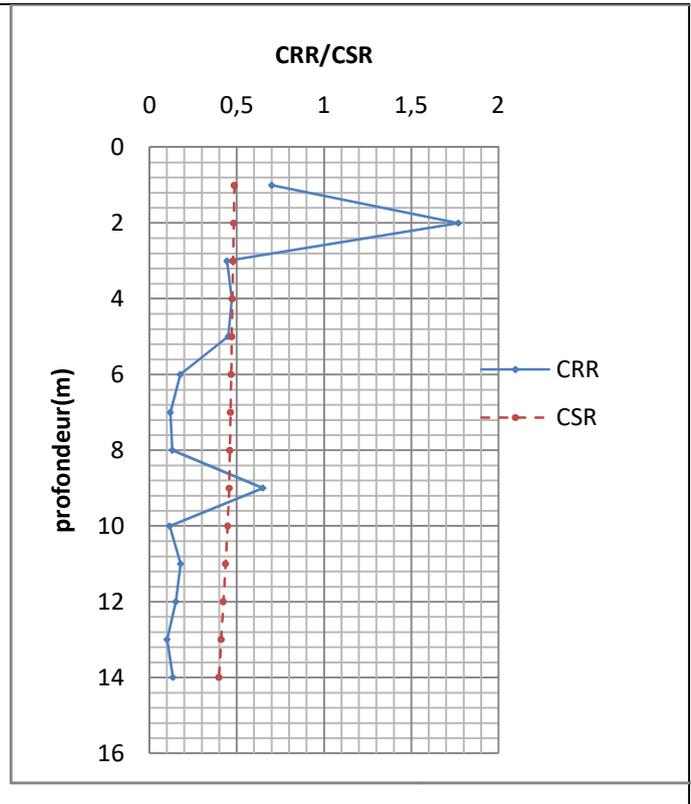


Figure III.24 : Variation CRR/CSR en fct de la profondeur du Sondage S 08

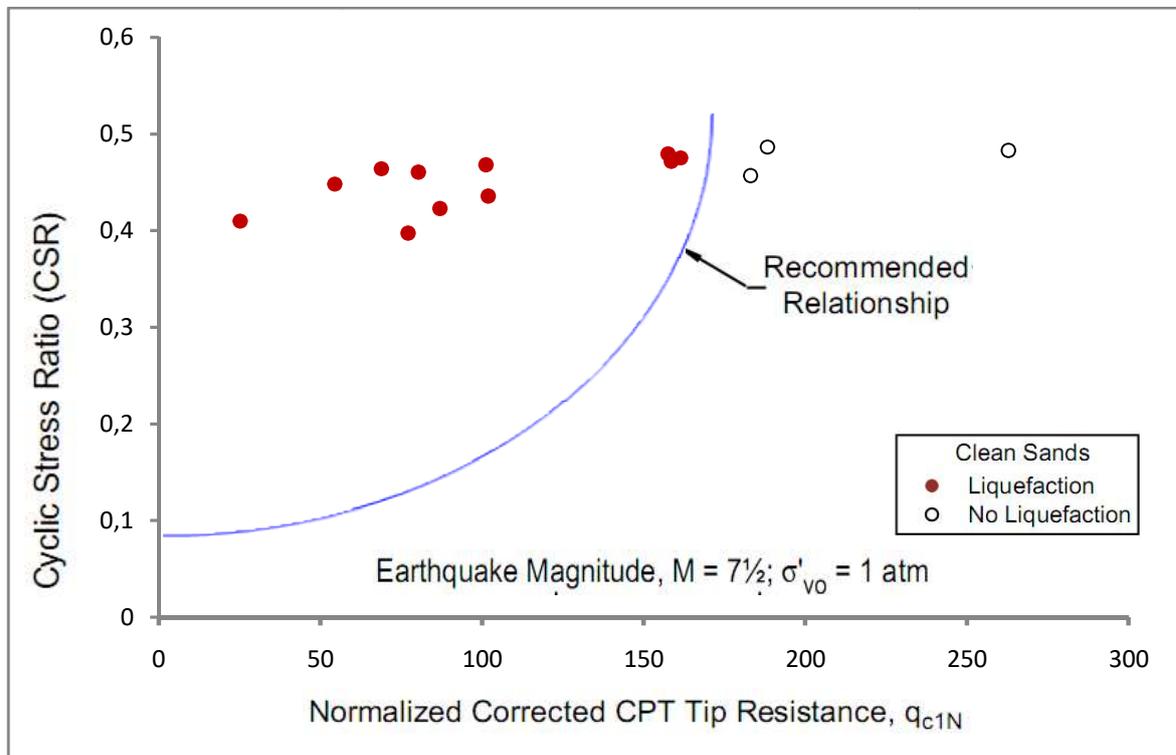


Figure III.25: Variation CSR en fonction q_{c1N} . Sondage S 08

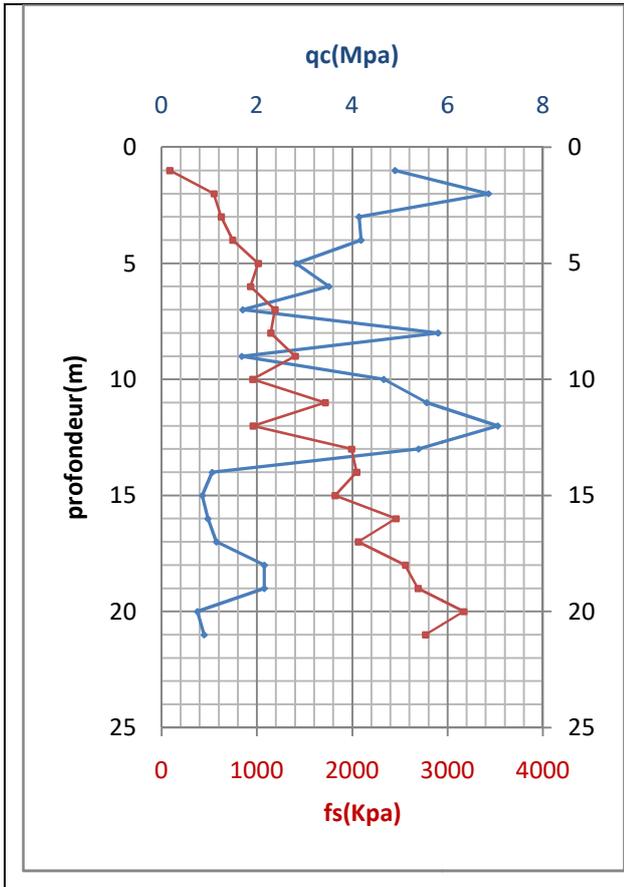


Figure III.26 : Variation f_s/q_c en fct de la profondeur du Sondage S 09

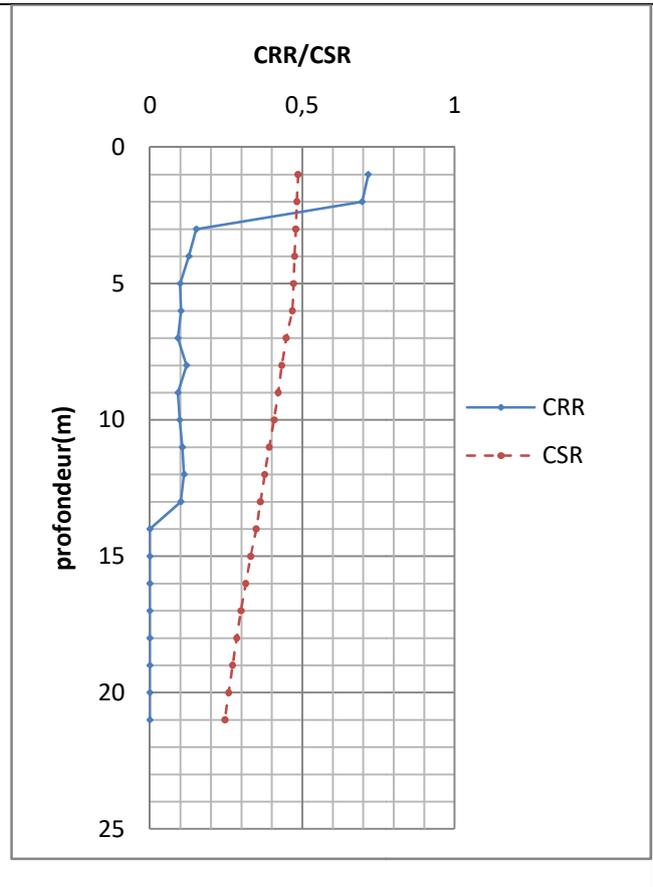


Figure III.27 : Variation CRR/CSR en fct de la profondeur du Sondage S 09

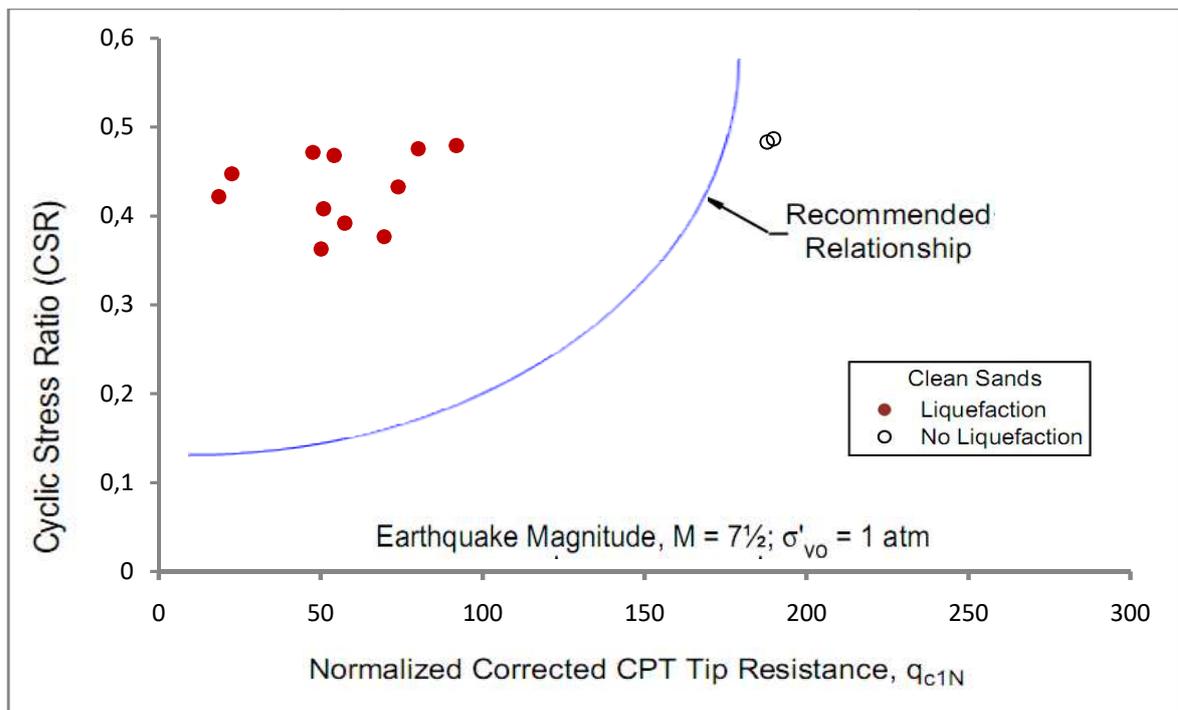


Figure III.28 : Variation CSR en fonction q_{c1N} Sondage S 09

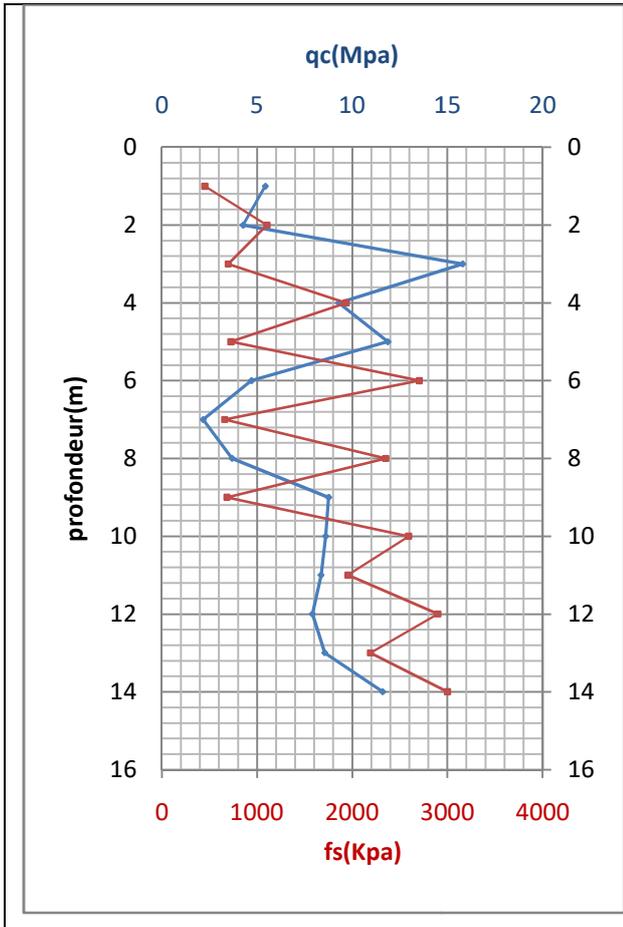


Figure III.29 : Variation f_s/q_c en fct de la profondeur du Sondage S 10

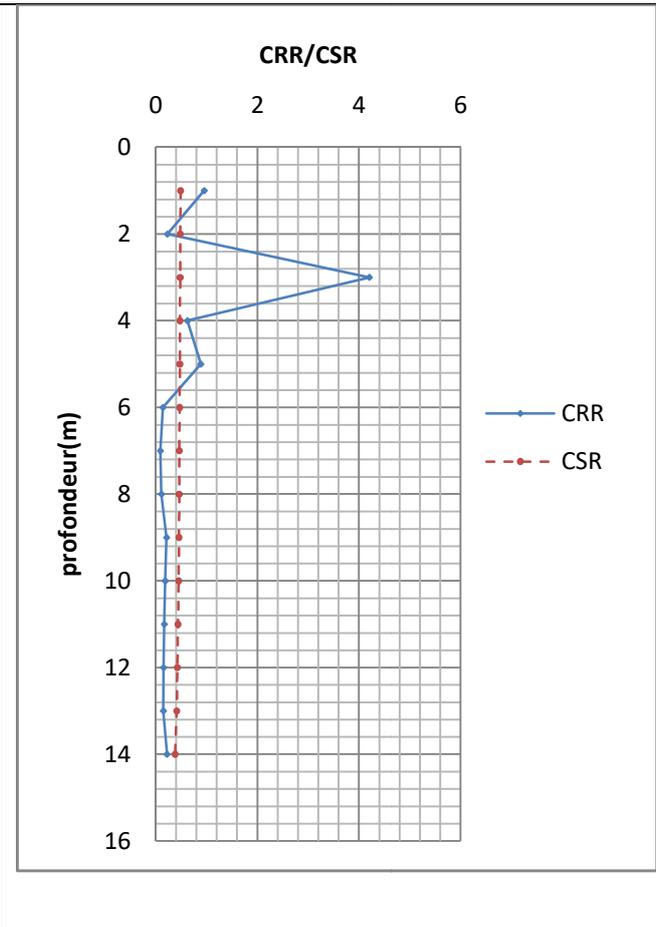


Figure III.30 : Variation CRR/CSR en fct de la profondeur du Sondage S 10

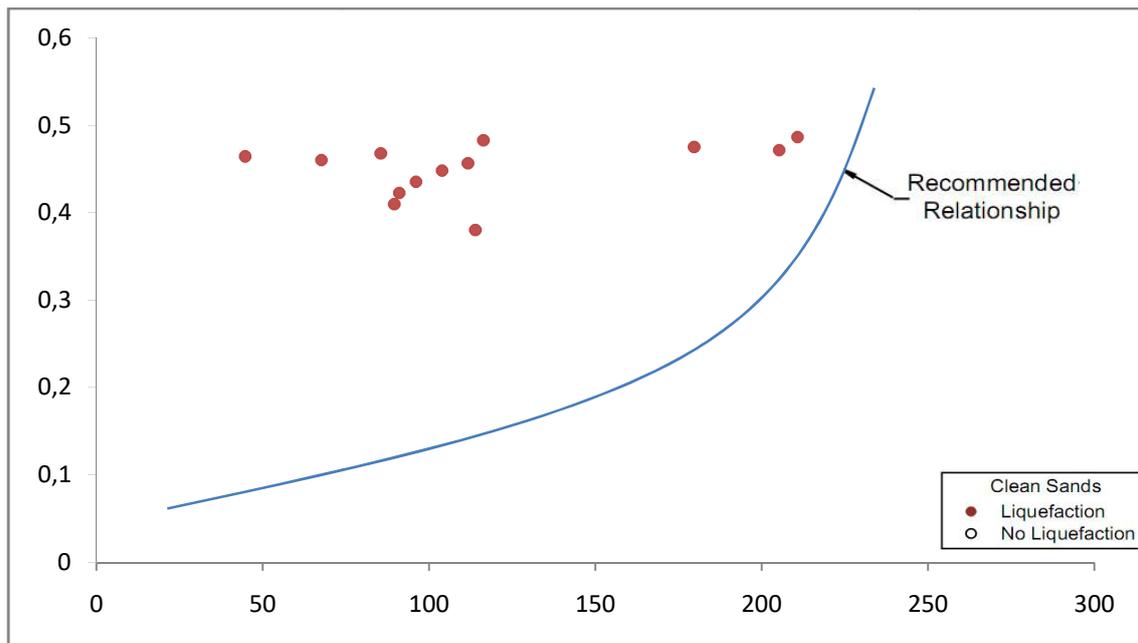


Figure III.31: Variation CSR en fonction q_{c1N} Sondage S 10

Pour le sondage S01 :

La charge de pointe varie entre 0,69 MPA (profondeur 18m) à 15,88 MPA (profondeur 21,22m), dont les plus faibles valeurs situées entre 15 à 18 m de profondeur .

Le facteur de sécurité F_s varie entre 0,352 et 1,207 (risque de liquéfactions sur toute la profondeur du sondage) .(RPA liquéfaction si $F_s < 1,25$).

Pour le sondage S02 :

La charge de pointe varie entre 0,85 MPA (profondeur 19m) à 10,98 MPA (profondeur 22m),

Le facteur de sécurité F_s varie entre 0,198 et 0,885 (risque de liquéfactions à partir de 2m de profondeur)

Pour le sondage S03 :

La charge de pointe varie entre 0,2 MPA (profondeur 20m) à 7,27 MPA (profondeur 14m),

Le facteur de sécurité F_s varie entre 0,209 et 0,44 (risque de liquéfactions à partir de 2m de profondeur)

Pour le sondage S04 :

La charge de pointe varie entre 0,51 MPA à 7,77 MPA ,

Le facteur de sécurité F_s varie entre 0,214 et 0,37 (risque de liquéfactions à partir de 3m de profondeur).

Pour le sondage S06 :

La charge de pointe varie entre 0,94 MPA (7m de profondeur) à 7,77 MPA (12m de profondeur),

On cite que les résultats pour ce sondage arrêtent à 14m de profondeur .

Le facteur de sécurité F_s varie entre 0,22 et 1,23 (risque de liquéfactions à partir de $Z=3m$).

Pour le sondage S07 :

La charge de pointe varie entre 0,46 MPA (9m de profondeur) à 7,2 MPA (2m de profondeur),

Le facteur de sécurité F_s varie entre 0,18 et 0,298 (risque de liquéfactions à partir de $Z=3m$).

Pour le sondage S09 :

La charge de pointe varie entre 0,75 MPA (20m de profondeur) à 7,05 MPA (12m de profondeur),

On cite que les résultats pour ce sondage arrêtent à 14m de profondeur .

Le facteur de sécurité F_s varie entre 0,205 et 0,31 (risque de liquéfactions à partir de $Z=3m$).

Pour le sondage S10 :

La charge de pointe varie entre 2,16 MPA (7m de profondeur) à 15,8 MPA (3m de profondeur),

On cite que les résultats pour ce sondage arrêtent à 14m de profondeur .

Le facteur de sécurité F_s varie entre 0,205 et 0,3177 (risque de liquéfactions à partir de $Z=3m$).

CHAPITRE IV : RESULTATS DE L'ANALYSE GEOSTATISTIQUE

IV.1. Introduction :

Les propriétés du sol ne varient généralement pas au hasard dans l'espace ; plutôt cette variation est progressive et suit un modèle qui peut être quantifiée en utilisant ce qu'on appelle la structure de corrélation spatiale. Cette structure peut être exprimée en termes du variogramme ou de la fonction de covariance.

Dans ce chapitre, l'approche géostatistique a été utilisée pour évaluer le coefficient de sécurité contre la liquéfaction du sol pour le sol en considération. Quatre profondeurs ont été prises pour les différents sondages.

IV.2. Histogramme du coefficient de sécurité :

Pour procéder à l'analyse des caractéristiques géostatistiques, différentes variables aléatoires, telles que la moyenne, la variance, la distribution de probabilité et la structure de corrélation, doivent être déterminées.

La figure (IV.01 ;IV.02 ;IV.03 ;IV.04) montre l'histogramme du coefficient de sécurité pour tous les sondages avec les profondeurs de $Z=3$, $Z=6$, $Z=9$ et $Z=12$ respectivement.

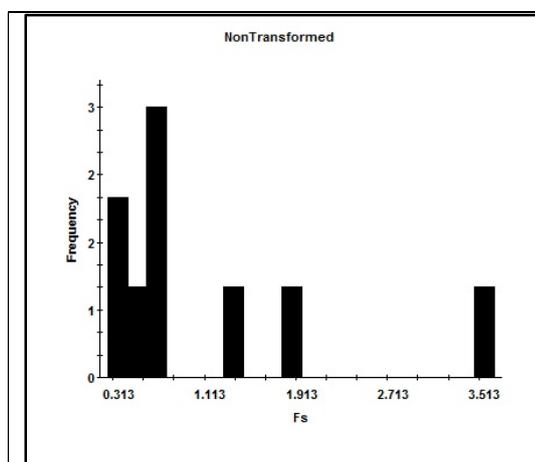


Figure IV.1 Histogramme du coefficient de sécurité pour $Z=03m$

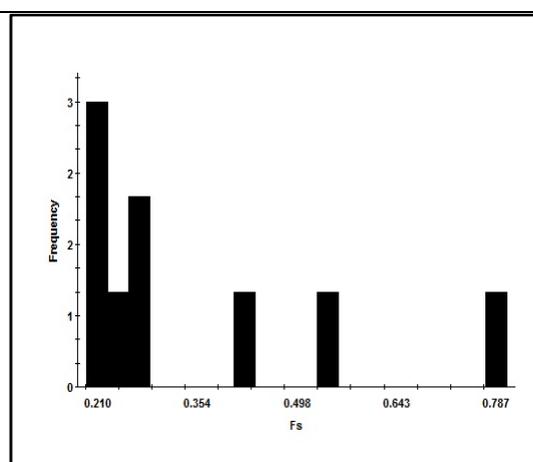


Figure IV.2 Histogramme du coefficient de sécurité pour $Z=06m$

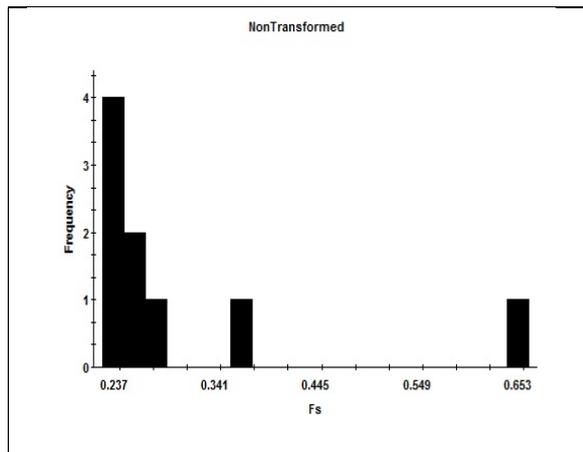


Figure IV.3 Histogramme du coefficient de sécurité pour Z=09m

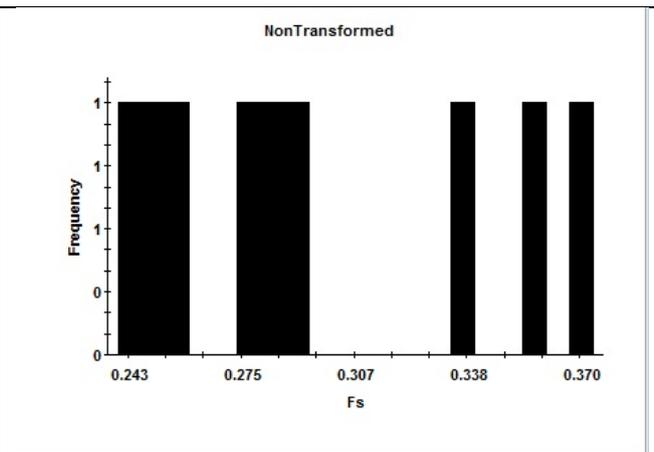


Figure IV.4 Histogramme du coefficient de sécurité pour Z=12m

IV.3. Variogrammes du coefficient de sécurité :

Le logiciel GS+ a été utilisé pour obtenir les caractéristiques des variogrammes dans la direction verticale et horizontale pour chaque profondeur (figure (IV.05), (IV.06), (IV.07), (IV.08)), les variogrammes local sont modélisé dans le programme en adaptant automatiquement un modèle de variogramme Plusieurs modèles de variogramme sont disponibles dans le programme, à savoir sphérique, exponentielle, gaussienne et linéaire avec seuil. Il faut noter que les caractéristiques des variogrammes obtenus pour l'analyse des données FS, sont généralement sensibles aux conditions du dépôt de sol, de l'histoire de la charge et du pourcentage de fine. Cela explique la variation des caractéristiques du variogramme d'un type à l'autre.

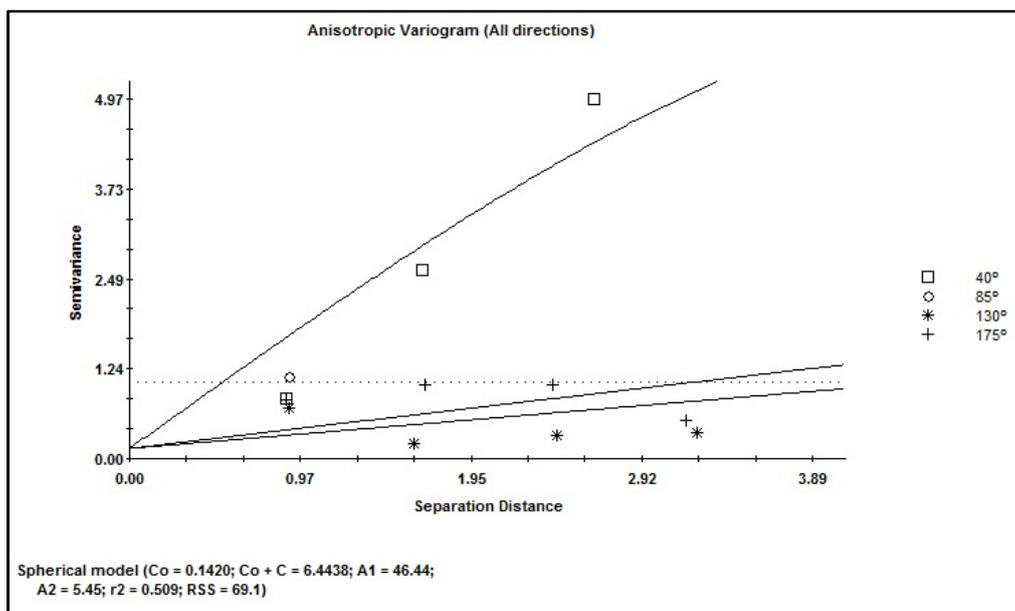


Figure IV.5: Variogramme expérimentale et théorique du FS pour Z=3m

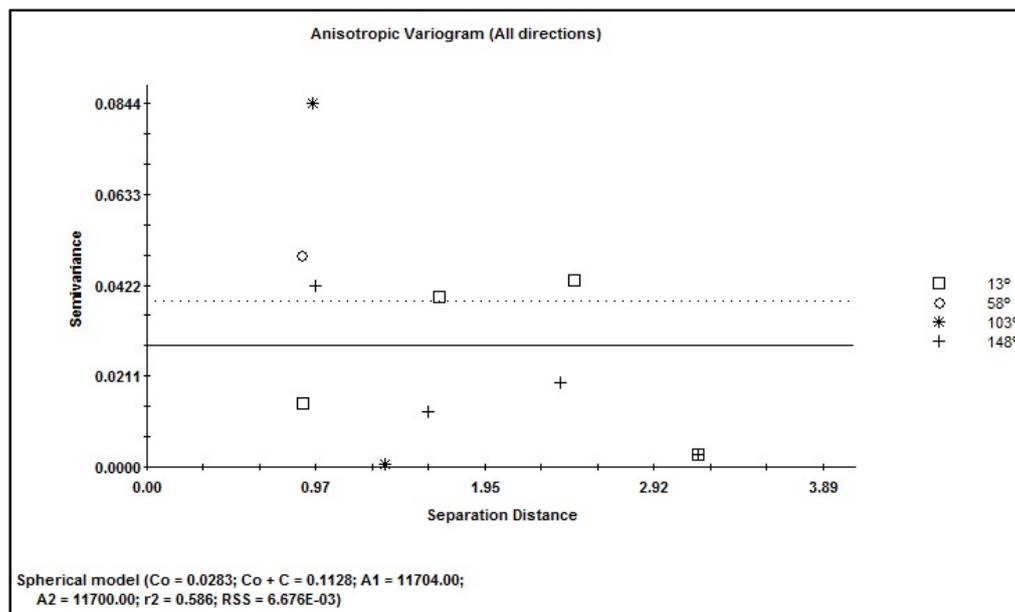


Figure IV.6: Variogramme expérimentale et théorique du FS pour Z=6m

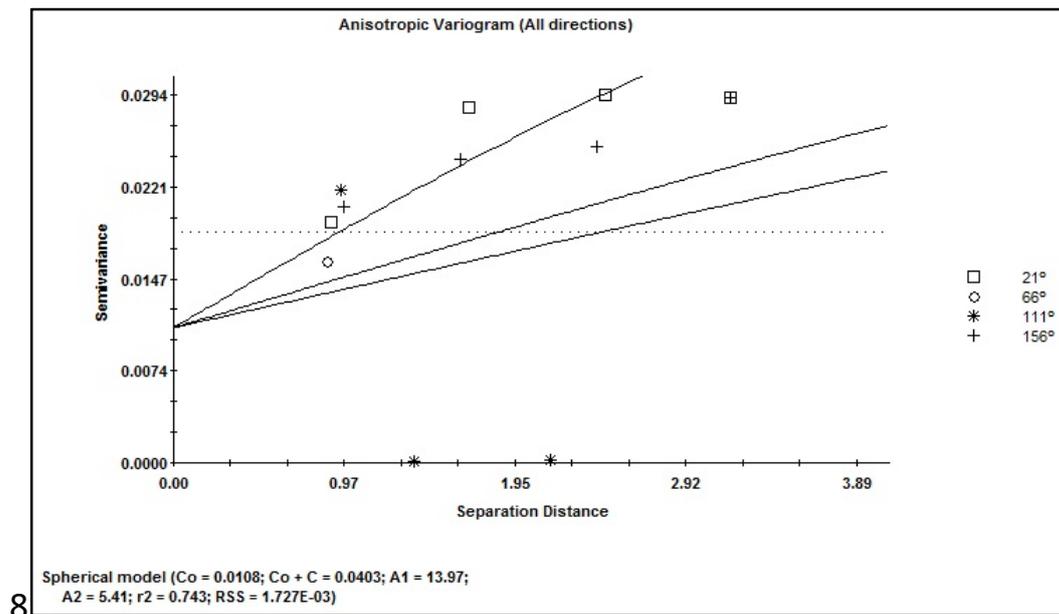


Figure IV.7: Variogramme expérimentale et théorique du FS pour Z=9m

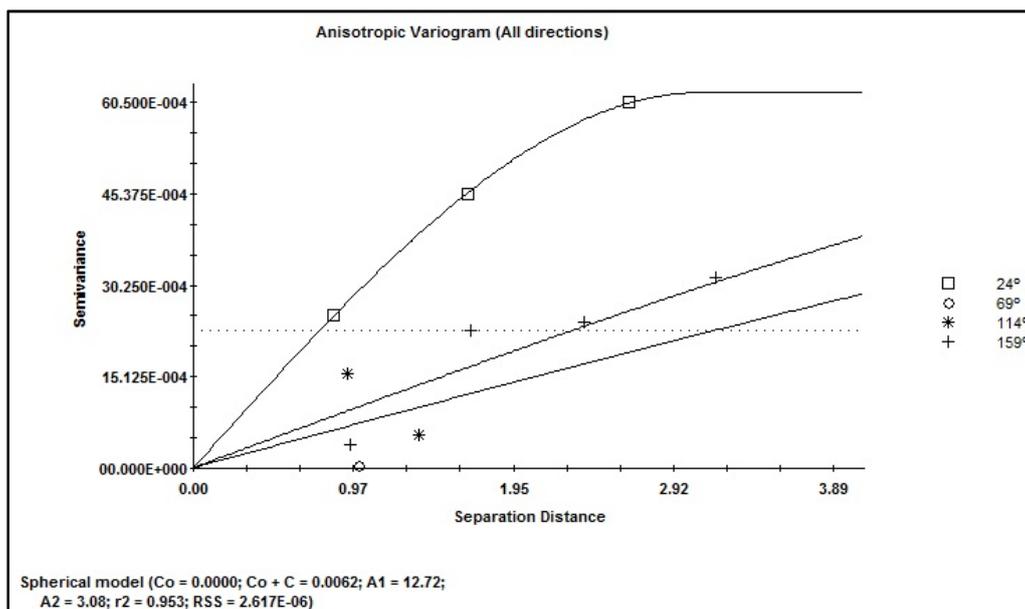


Figure IV.8 : Variogramme expérimentale et théorique du FS pour Z=12m

Le tableau (IV/ 01) suivants résume quelques caractéristiques estimées des variogrammes expérimentaux obtenus à partir des résultats des essais in situ sur le site. Les variogrammes de surfaces présentent des anisotropies variables sur le plan. Peut être elle liée à la différence entre les nombres de point entre les directions Les variogrammes

CHAPITRE IV : RESULTATS DE L'ANALYSE GEOSTATISTIQUE

expérimentaux directionnels ont été calculés et modélisés par des schémas exponentiel montrent un effet de pépité qui varie entre 0 et 0.142 Kpa pour les quatre profondeurs.

Tableau IV.1: Caractéristiques des variogrammes pour Z=(03 ;06 ;09 ;12)m

Type	Effet de pépité	Variance	Modèle	Palier	Portée (m)
Z1(3.00m)	0,142	6.4438	sphérique	1.07	3.241
Z2(6.00m)	0.0283	0.1128	sphérique	0.0386	3.89
Z3(9.00m)	0.0108	0.0403	sphérique	0.0184	2.405
Z4(12.00m)	0.000	0.0062	sphérique	0,0226	2.275

L'existence d'un palier de 1.07 pour la résistance de pointe, ce palier correspond à la valeur autour de laquelle se stabilise le variogramme (model sphérique pour Z=3.00m).

L'existence d'une portée de 3.24m, à partir de cette valeur le palier est atteinte. Cette valeur représente la distance d'auto corrélation, c'est-à-dire il ya corrélation spatiale sur les couples de points distants de 3.24m, au delà de cette distance, il ya indépendance entre deux points.

Ces différentes caractéristiques montrent le coefficient de sécurité de la zone d'étude n'est pas répartie de façon aléatoire, les variogrammes sont spatialement bien structuré.

Les variogrammes expérimentaux présentent une discontinuité à l'origine. Cet effet de pépité peut être lié à l'action combiné des hétérogénéités spatiale à plus petite échelle et à des incertitudes de mesure. L'effet de pépité sur les variogrammes indique que la variabilité étudié est très irrégulière. L'existence d'un palier au niveau des variogrammes traduit un phénomène stationnaire.

IV.4. Cartes des coefficients de sécurité :

les figures suivantes (figure : IV.9; IV.10; IV.11 et IV.12) montrent les cartes de variation du coefficients de sécurité en surfaces on utilisant le logiciel GS+.

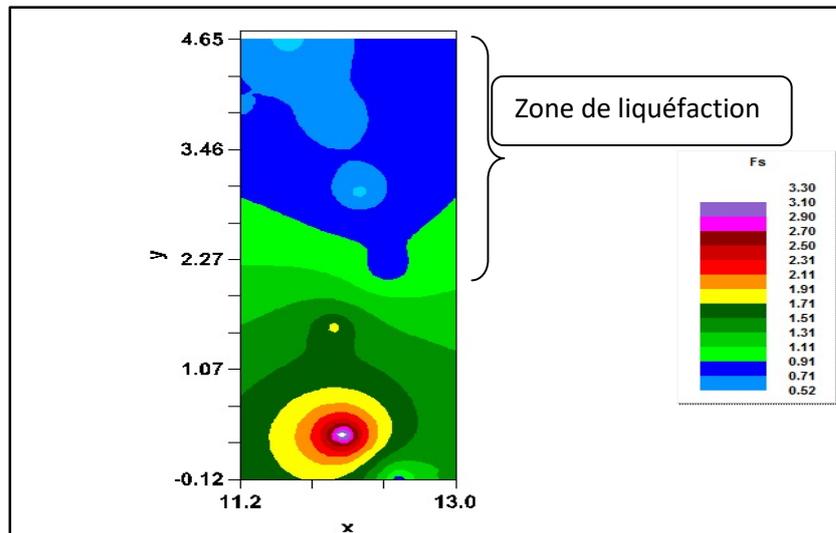


Figure IV.9 : Variation du coefficient de sécurité pour Z=03m

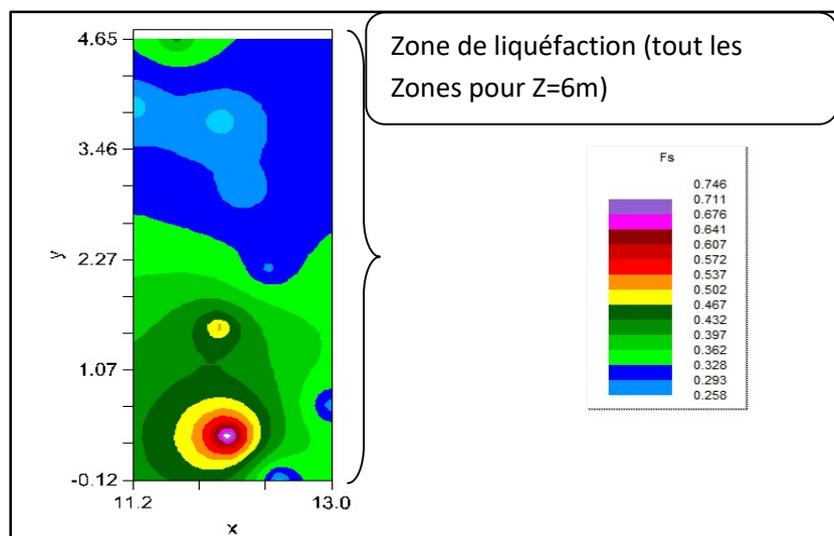


Figure IV.10 : Variation du coefficient de sécurité pour Z=06m

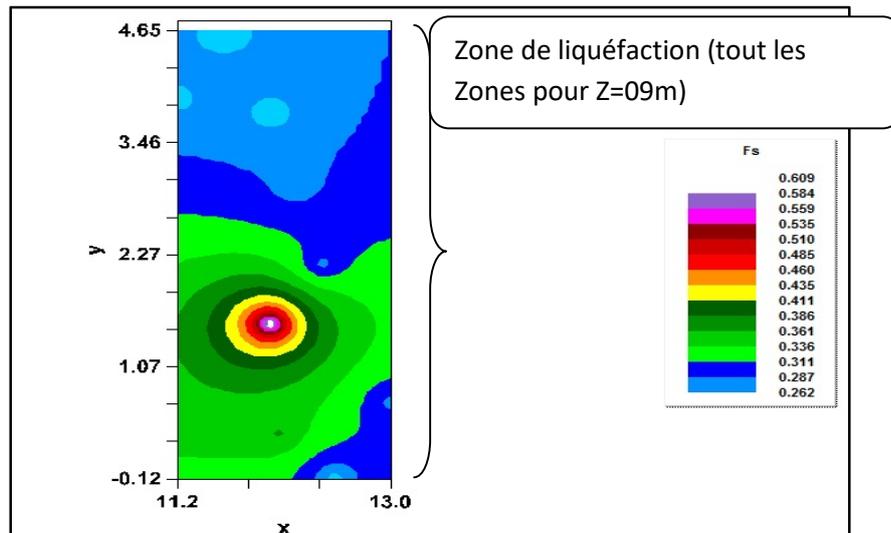


Figure IV.11 : Variation du coefficient de sécurité pour Z=09m

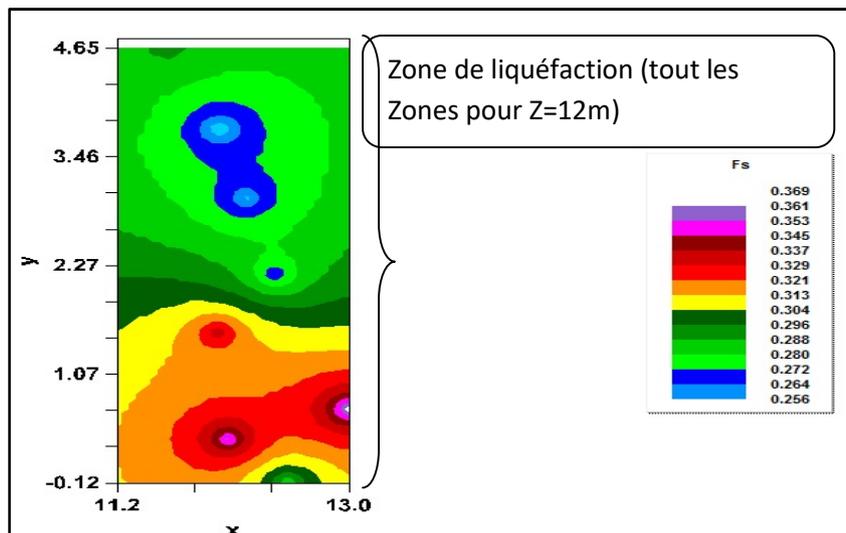


Figure IV.12 : Variation du coefficient de sécurité pour Z=12m

Les résultats montrent que le coefficient de sécurité varia entre 0,52 à 3,3 pour une profondeur de 3m, 0,258 à 0,746 pour une profondeur de 6m, 0,262 à 0,609 pour une profondeur de 9m et entre 0,256 à 0,369 pour une profondeur de 12m.

IV.5. Conclusion

Il a été constaté dans plusieurs cas que la prise en compte du facteur de sécurité uniquement pourrait ne pas être une mesure précise de la liquéfaction susceptible, car il ne saisit pas nécessairement l'effet de profondeur des couches potentiellement liquéfiables.

L'analyse géostatistique montre que les variogrammes caractérisés par un palier, une portée, et un effet de pépite sont spatialement bien structurés.

Conclusion générale

Les propriétés du sol ne varient pas de façon aléatoire dans l'espace; plutôt une telle variation est progressive et suit un modèle qui peut être quantifiée.

Il faut reconnaître que les développements récents ne sont pas toujours de nature à améliorer la qualité de l'estimation finale. Celle-ci, est limitée en général par des facteurs inhérents au milieu modélisé : une variabilité spatiale des terrains mal connue, des calculs effectués sur des données très partielles issues de campagne de reconnaissance et une maîtrise imparfaite des différentes phases de constructions .

Dans ce mémoire, une approche géostatistique simplifiée a été adoptée pour évaluer l'effet du coefficient de sécurité des propriétés du sol sur la réponse induit par le tremblement de terre sur le site de l'aéroport d'Alger.

En Algérie, la tectonique active est localisée dans la région nord du pays, essentiellement dans le Tell. ... Ces dernières sont le plus souvent à l'origine des violents tremblements de terre que connaît l'Algérie. Plus au sud, la sismicité s'exprime, tout le long du Tell, le long des faisceaux de plis de direction NE-SW.

Le dernier tremblement de terre qui a frappé le nord Algérien nous rappelle une fois de plus que c'est une région où de violent séisme peuvent se produire. Dans cette région, les plaques africaine et eurasienne poussent l'une contre l'autre et engendrent des activités sismiques croissantes

La législation de la majorité des pays interdit explicitement la construction d'aérodromes dans des zones à haut risque, à l'exception des endroits où le manque de place est flagrant et où d'autres variables de risque sont donc mises en considération.

L'analyse géostatistique montre que le site étudié présente un grand risque de liquéfaction ce dernier nécessite une amélioration importante de sol d'assise (drainage ou abaissement de la nappe phréatique), ou un changement de site ce qui n'est pas possible (projet déjà réalisé).

ANNEXES

Valeurs qc Sondage N°01

Lithologie	h	qc (MPa)	Qt (KN)	Qst (KN)	Qs (KN)	fs (KN)	qc (KN)
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	4,54	7,52	2,98	2,98	198,67	4540
	2	5,91	14,74	8,83	5,85	390	5910
	3	5,08	25,42	20,34	14,49	966	5080
	4	4,05	36,67	32,62	18,13	1208,67	4050
	5	3,09	38,72	35,63	17,5	1166,67	3090
	6	3,5	31,43	27,93	10,43	695,33	3500
	7	6,53	35,46	28,93	18,5	1233,33	6530
	8	10,13	44,5	34,37	15,87	1058	10130
	9	4,2	57,06	52,86	36,99	2466	4200
Sable fin verdâtre à gris claire argileux carbonaté	10	2,14	57,93	55,79	18,8	1253,33	2140
	11	5,25	54,87	49,62	30,82	2054,67	5250
	12	3,32	56,34	53,02	22,2	1480	3320
	13	6,32	61,64	55,32	33,12	2208	6320
	14	8,57	63,77	55,2	22,08	1472	8570
	15	1,95	70,52	68,57	46,49	3099,33	1950
	16	3,71	73,93	70,22	23,73	1582	3710
	17	0,79	77,51	76,72	52,99	3532,67	790
	18	0,69	78,61	77,92	24,93	1662	690
	19	2	77,79	75,79	50,86	3390,67	2000
	20	1,22	81,36	80,14	29,28	1952	1220
Marne grise claire	21	8,73	88,51	79,78	50,5	3366,67	8730
	21,22	15,88	89,25	73,37	22,87	1524,67	15880

Calcul qc Sondage N°02

Lithologie	h	qc (MPa)	Qt (KN)	Qst (KN)	Qs (KN)	fs (KN)	qc (KN)
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	7,46	13,04	5,58	5,58	372	7460
	2	5,67	27,12	21,45	15,87	1058	5670
	3	4,81	30,27	25,46	9,59	639,33	4810
	4	4,83	34,52	29,69	20,1	1340	4830
	5	1,46	37,92	36,46	16,36	1090,67	1460
	6	3,32	34,56	31,24	14,88	992	3320
	7	3,61	34,17	30,56	15,68	1045,33	3610
	8	5,41	34,28	28,87	13,19	879,33	5410
	9	4,72	38,43	33,71	20,52	1368	4720
	10	4,34	39,52	35,18	14,66	977,33	4340
	11	4,44	45,18	40,74	26,08	1738,67	4440
	12	4,94	45,97	41,03	14,95	996,67	4940
	13	5,44	50,32	44,88	29,93	1995,33	5440
	14	6,86	54,44	47,58	17,65	1176,67	6860
	15	1,52	61,4	59,88	42,23	2815,33	1520
Marne finement sableuse grise verdâtre	16	0,92	62,96	62,04	19,81	1320,67	920
	17	1,06	66,23	65,17	45,36	3024	1060
	18	1,66	67,54	65,88	20,52	1368	1660
	19	0,85	70,21	69,36	48,84	3256	850
	20	2,43	74,34	71,91	23,07	1538	2430
Marne grise claire indurée avec des cassures conchoïdales	21	0,98	78,62	77,64	54,57	3638	980
	22	10,98	81,45	70,47	15,9	1060	10980

Calcul qc Sondage N°03

Lithologie	h	qc (MPa)	Qt (KN)	Qst (KN)	Qs (KN)	fs (KN)	qc (KN)
Sable fin jaunâtre	1	5,11	7,28	2,17	2,17	144,67	5110
	2	4,12	22,52	18,4	16,23	1082	4120
	3	4,1	23,51	19,41	3,18	212	4100
	4	4,76	31,46	26,7	23,52	1568	4760
	5	3,17	33,41	30,24	6,72	448	3170
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	6	3,81	36,01	32,2	25,48	1698,67	3810
	7	6,04	36,88	30,84	5,36	357,33	6040
	8	1,74	40,46	38,72	33,36	2224	1740
	9	6,27	44,63	38,36	5	333,33	6270
	10	5,77	44,51	38,74	33,74	2249,33	5770
	11	4,97	44,53	39,56	5,82	388	4970
	12	4,37	44,4	40,03	34,21	2280,67	4370
	13	6,99	49,17	42,18	7,97	531,33	6990
	14	7,27	60,2	52,93	44,96	2997,33	7270
Marne grise claire	15	0,81	64,6	63,79	18,83	1255,33	810
	16	1,02	68,32	67,3	48,47	3231,33	1020
	17	1,61	69,6	67,99	19,52	1301,33	1610
	18	0,7	71,45	70,75	51,23	3415,33	700
	19	0,92	72,54	71,62	20,39	1359,33	920
	20	0,2	73,68	73,48	53,09	3539,33	200
	21	0,61	82,87	82,26	29,17	1944,67	610

calcul qc Sondage N°04

Lithologie	h	qc (MPa)	Qt (KN)	Qst (KN)	Qs (KN)	fs (KN)	qc (KN)
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	7,77	10,84	3,07	3,07	204,67	7770
	2	6,18	28	21,82	18,75	1250	6180
	3	4,57	29,97	25,4	6,65	443,33	4570
	4	3,66	38,04	34,38	27,73	1848,67	3660
	5	3,62	41,33	37,71	9,98	665,33	3620
	6	4,57	40,84	36,27	26,29	1752,66	4570
	7	6,08	41,33	35,25	8,96	597,33	6080
	8	7,3	39,28	31,98	23,02	1534,66	7300
	9	0,71	51,96	51,25	28,23	1882	710
Grès conglomératique ocre à jaunâtre de moyenne qualité	10	1,6	54,91	53,31	25,08	1672	1600
	11	3,82	45,48	41,66	16,58	1105,33	3820
Marne grise claire indurée avec des cassures conchoïdales	12	4,82	53,75	48,93	32,35	2156,66	4820
	13	5,97	53,92	47,95	15,6	1040	5970
	14	5,17	62,41	57,24	41,64	2776	5170
	15	1,05	66,36	65,31	23,67	1578	1050
	16	1,51	71,08	69,57	45,9	3060	1510
	17	4,16	71,92	67,76	21,86	1457,33	4160
	18	0,87	77,1	76,23	54,37	3624,66	870
	19	4,41	79,35	74,94	20,57	1371,33	4410
	20	0,51	83,11	82,6	62,03	4135,33	510
	21	0,65	84,77	84,12	22,09	1472,66	650

Calcul qc Sondage N°06

Lithologie	h	qc (MPa)	Qt (KN)	Qst (KN)	Qs (KN)	fs (KN)	qc (KN)
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	5,08	8,24	3,16	3,16	210,67	5080
	2	8,04	22,02	13,98	10,82	721,33	8040
	3	7,31	31,28	23,97	13,15	876,67	7310
	4	7,14	39,66	32,52	19,37	1291,33	7140
	5	4,82	44,21	39,39	20,02	1334,67	4820
	6	4,52	44,34	39,82	19,8	1320	4520
	7	0,94	41,92	40,98	21,18	1412	940
	8	3,44	52,17	48,73	27,55	1836,67	3440
	9	7,52	57,95	50,43	22,88	1525,33	7520
	10	3,94	65,94	62	39,12	2608	3940
	11	7,61	67,18	59,57	20,45	1363,33	7610
	12	10,18	81,24	71,06	50,61	3374	10180
	13	6,2	90	83,8	33,19	2212,67	6200
	14	5,54	90	84,46	51,27	3418	5540

Calcul qc Sondage N°07

Lithologie	h	qc (MPa)	Qt (KN)	Qst(KN)	Qs(KN)	fs (KN)	qc(KN)
Sable fin jaunâtre	1	5,07	5,69	0,62	0,62	41,33	5070
	2	7,2	12,61	5,41	4,79	319,33	7200
	3	3,31	22,11	18,8	14,01	934	3310
	4	0,55	22,5	21,95	7,94	529,33	550
	5	3,25	29,52	26,27	18,33	1222	3250
	6	3,73	30,21	26,48	8,15	543,33	3730
	7	3,5	33,96	30,46	22,31	1487,33	3500
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	8	3,68	37,96	34,28	11,97	798	3680
	9	0,46	36,56	36,1	24,13	1608,67	460
	10	5,86	36,96	31,1	6,97	464,67	5860
	11	6,27	39,72	33,45	26,48	1765,33	6270
	12	6,3	37,89	31,59	5,11	340,67	6300
	13	5,18	40,29	35,11	30	2000	5180
	14	7,04	46,94	39,9	9,9	660	7040
	15	5,25	53,54	48,29	38,39	2559,33	5250
Marne grise claire	16	1,46	59,25	57,79	19,4	1293,33	1460
	17	2,57	64,93	62,36	42,96	2864	2570
	18	1,24	66,7	65,46	22,5	1500	1240
	19	0,83	70,88	70,05	47,55	3170	830
	20	1,76	75,33	73,57	26,02	1734,67	1760
	21	0,64	75,88	75,24	49,22	3281,33	640

Calcul qc **Sondage N°08**

Lithologie	h	qc (MPa)	Qt (KN)	Qst (KN)	Qs (KN)	fs (KN)	qc (KN)
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	3,28	6,47	3,19	3,19	212,67	3280
	2	10,78	20,46	9,68	6,49	432,67	10780
	3	7,06	34,33	27,27	20,78	1385,33	7060
	4	8,36	41,23	32,87	12,09	806	8360
Sable fin gris verdâtre peu argileux	5	9,19	47,26	38,07	25,98	1732	9190
	6	6,47	50,65	44,18	18,2	1213,33	6470
	7	4,8	45,12	40,32	22,12	1474,67	4800
	8	5,97	49,59	43,62	21,5	1433,33	5970
	9	12,67	56,66	43,99	22,49	1499,33	12670
	10	4,59	71,41	66,82	44,33	2955,33	4590
	11	8,87	80,62	71,75	27,42	1828	8870
	12	7,94	79,83	71,89	44,47	2964,67	7940
	13	2,55	85,94	83,39	38,92	2594,67	2550
	14	7,65	90	82,35	43,43	2895,33	7650

Calcul qc **Sondage N°09**

Lithologie	h	qc (MPa)	Qt (KN)	Qst (KN)	Qs (KN)	fs (KN)	qc (KN)
Sable fin jaunâtre	1	2,22	3,48	1,26	1,26	84	2220
	2	6,25	15,73	9,48	8,22	548	6250
	3	4,14	21,72	17,58	9,36	624	4140
	4	4,18	24,7	20,52	11,16	744	4180
	5	2,82	29,17	26,35	15,19	1012,67	2820
	6	3,51	32,66	29,15	13,96	930,67	3510
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	7	1,7	33,49	31,79	17,83	1188,67	1700
	8	5,8	40,79	34,99	17,16	1144	5800
	9	1,68	39,86	38,18	21,02	1401,33	1680
	10	4,66	40	35,34	14,32	954,67	4660
	11	5,56	45,62	40,06	25,74	1716	5560
	12	7,05	47,14	40,09	14,35	956,67	7050
	13	5,39	49,62	44,23	29,88	1992	5390
	14	1,06	61,62	60,56	30,68	2045,33	1060
Marne grise claire	15	4,3	62,28	57,98	27,3	1820	4300
	16	0,97	65,12	64,15	36,85	2456,67	970
	17	1,15	68,94	67,79	30,94	2062,67	1150
	18	4,75	74,03	69,28	38,34	2556	4750
	19	6,03	84,72	78,69	40,35	2690	6030
	20	0,75	88,64	87,89	47,54	3169,33	750
	21	0,89	89,94	89,05	41,51	2767,33	890

Calcul qc Sondage N°10

Lithologie	h	qc (MPa)	Qt (KN)	Qst (KN)	Qs (KN)	fs (KN)	qc (KN)
Sable fin rougeâtre graveleux	1	5,43	12,19	6,76	6,76	450,66667	5430
	2	4,26	27,58	23,32	16,56	1104	4260
Sable fin jaunâtre	3	15,8	42,81	27,01	10,45	696,67	15800
	4	9,3	48,81	39,51	29,06	1937,33	9300
	5	11,87	51,79	39,92	10,86	724	11870
	6	4,7	56,13	51,43	40,57	2704,67	4700
	7	2,16	52,62	50,46	9,89	659,33	2160
	8	3,68	48,85	45,17	35,28	2352	3680
	9	8,76	54,29	45,53	10,25	683,33	8760
	10	8,6	57,71	49,11	38,86	2590,67	8600
	11	8,36	76,54	68,18	29,32	1954,67	8360
	12	7,9	80,71	72,81	43,49	2899,33	7900
13	8,55	84,9	76,35	32,86	2190,67	8550	
Marne grise bleuâtre indurée avec des cassures conchoïdales d'aspect rocheux	14	11,6	89,47	77,87	45,01	3000,67	11600

Calcul CSR Sondage N°01

Lithologie	Z (m)	amax (m/s ²)	g (m/s ²)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	rd	CSR
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	3	10	16,6	10	6,6	16,6	6,6	0,99235	0,4867026
	2	3	10	16,6	10	6,6	33,2	13,2	0,9847	0,4829506
	3	3	10	16,6	10	6,6	49,8	19,8	0,97705	0,4791986
	4	3	10	16,6	10	6,6	66,4	26,4	0,9694	0,4754466
	5	3	10	16,6	10	6,6	83	33	0,96175	0,4716947
	6	3	10	16,6	10	6,6	99,6	39,6	0,9541	0,4679427
	7	3	10	16,6	10	6,6	116,2	46,2	0,94645	0,4641907
	8	3	10	16,6	10	6,6	132,8	52,8	0,9388	0,4604387
	9	3	10	16,6	10	6,6	149,4	59,4	0,93115	0,4566868
Sable fin verdâtre à gris clair argileux carbonaté	10	3	10	19,5	10	9,5	168,9	68,9	0,914	0,4369092
	11	3	10	19,5	10	9,5	188,4	78,4	0,888	0,4161141
	12	3	10	19,5	10	9,5	207,9	87,9	0,862	0,3975644
	13	3	10	19,5	10	9,5	227,4	97,4	0,836	0,3806032
	14	3	10	19,5	10	9,5	246,9	106,9	0,81	0,3648069
	15	3	10	19,5	10	9,5	266,4	116,4	0,784	0,3498903
	16	3	10	19,5	10	9,5	285,9	125,9	0,758	0,3356543
	17	3	10	19,5	10	9,5	305,4	135,4	0,732	0,3219557
	18	3	10	19,5	10	9,5	324,9	144,9	0,706	0,3086886
	19	3	10	19,5	10	9,5	344,4	154,4	0,68	0,2957736
	20	3	10	19,5	10	9,5	363,9	163,9	0,654	0,2831493
Marne grise clair	21	3	10	23,2	10	13,2	387,1	177,1	0,628	0,2676695

Calcul CSR Sondage N°02

Lithologie	Z (m)	amax (m/s ²)	g (m/s ²)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	rd	CSR
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	3	10	16,6	10	6,6	16,6	6,6	0,9923 5	0,4867026
	2	3	10	16,6	10	6,6	33,2	13,2	0,9847	0,4829506
	3	3	10	16,6	10	6,6	49,8	19,8	0,9770 5	0,4791986
	4	3	10	16,6	10	6,6	66,4	26,4	0,9694	0,4754466
	5	3	10	16,6	10	6,6	83	33	0,9617 5	0,4716947
	6	3	10	16,6	10	6,6	99,6	39,6	0,9541	0,4679427
	7	3	10	16,6	10	6,6	116,2	46,2	0,9464 5	0,4641907
	8	3	10	16,6	10	6,6	132,8	52,8	0,9388	0,4604387
	9	3	10	16,6	10	6,6	149,4	59,4	0,9311 5	0,4566868
	10	3	10	16,6	10	6,6	166	66	0,914	0,4482755
	11	3	10	16,6	10	6,6	182,6	72,6	0,888	0,4355236
	12	3	10	16,6	10	6,6	199,2	79,2	0,862	0,4227718
	13	3	10	16,6	10	6,6	215,8	85,8	0,836	0,41002
	14	3	10	16,6	10	6,6	232,4	92,4	0,81	0,3972682
	15	3	10	16,6	10	6,6	249	99	0,784	0,3845164
Marne finement sableuse grise verdâtre	16	3	10	19,5	10	9,5	268,5	108,5	0,758	0,3657787
	17	3	10	19,5	10	9,5	288	118	0,732	0,3483824
	18	3	10	19,5	10	9,5	307,5	127,5	0,706	0,3320276
	19	3	10	19,5	10	9,5	327	137	0,68	0,3164978
	20	3	10	19,5	10	9,5	346,5	146,5	0,654	0,3016324
Marne grise claire indurée avec des cassures conchoïdales	21	3	10	23,2	10	13,2	369,7	159,7	0,628	0,2834907
	22	3	10	23,2	10	13,2	392,9	172,9	0,602	0,2667584

Calcul CSR Sondage N°03

Lithologie	Z (m)	amax (m/s ²)	g (m/s ²)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	rd	CSR
Sable fin jaunâtre	1	3	10	16,6	10	6,6	16,6	6,6	0,99235	0,4867026
	2	3	10	16,6	10	6,6	33,2	13,2	0,9847	0,4829506
	3	3	10	16,6	10	6,6	49,8	19,8	0,97705	0,4791986
	4	3	10	16,6	10	6,6	66,4	26,4	0,9694	0,4754466
	5	3	10	16,6	10	6,6	83	33	0,96175	0,4716947
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	6	3	10	16,6	10	6,6	99,6	39,6	0,9541	0,4679427
	7	3	10	16,6	10	6,6	116	46,2	0,94645	0,4641907
	8	3	10	16,6	10	6,6	133	52,8	0,9388	0,4604387
	9	3	10	16,6	10	6,6	149	59,4	0,93115	0,4566868
	10	3	10	16,6	10	6,6	166	66	0,914	0,4482755
	11	3	10	16,6	10	6,6	183	72,6	0,888	0,4355236
	12	3	10	16,6	10	6,6	199	79,2	0,862	0,4227718
	13	3	10	16,6	10	6,6	216	85,8	0,836	0,41002
Marne grise claire	14	3	10	16,6	10	6,6	232	92,4	0,81	0,3972682
	15	3	10	23,2	10	13,2	256	105,6	0,784	0,3700391
	16	3	10	23,2	10	13,2	279	118,8	0,758	0,3468807
	17	3	10	23,2	10	13,2	302	132	0,732	0,3265718
	18	3	10	23,2	10	13,2	325	145,2	0,706	0,3083353
	19	3	10	23,2	10	13,2	348	158,4	0,68	0,291653
	20	3	10	23,2	10	13,2	372	171,6	0,654	0,2761664
21	3	10	23,2	10	13,2	395	184,8	0,628	0,2616191	

Calcul CSR Sondage N°04

Lithologie	Z (m)	amax (m/s ²)	g (m/s ²)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	rd	CSR
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	3	10	16,6	10	6,6	16,6	6,6	0,99235	0,4867026
	2	3	10	16,6	10	6,6	33,2	13,2	0,9847	0,4829506
	3	3	10	16,6	10	6,6	49,8	19,8	0,97705	0,4791986
	4	3	10	16,6	10	6,6	66,4	26,4	0,9694	0,4754466
	5	3	10	16,6	10	6,6	83	33	0,96175	0,4716947
	6	3	10	16,6	10	6,6	99,6	39,6	0,9541	0,4679427
	7	3	10	16,6	10	6,6	116,2	46,2	0,94645	0,4641907
	8	3	10	16,6	10	6,6	132,8	52,8	0,9388	0,4604387
	9	3	10	16,6	10	6,6	149,4	59,4	0,93115	0,4566868
Grès conglomère à jaunâtre de moyenne qualité	10	3	10	21	10	11	170,4	70,4	0,914	0,4313976
	11	3	10	21	10	11	191,4	81,4	0,888	0,40716
Marne grise claire indurée avec des cassures conchoïdales	12	3	10	24,2	10	14,2	215,6	95,6	0,862	0,3790816
	13	3	10	24,2	10	14,2	239,8	109,8	0,836	0,3560309
	14	3	10	24,2	10	14,2	264	124	0,81	0,3362806
	15	3	10	24,2	10	14,2	288,2	138,2	0,784	0,3188134
	16	3	10	24,2	10	14,2	312,4	152,4	0,758	0,3029911
	17	3	10	24,2	10	14,2	336,6	166,6	0,732	0,2883931
	18	3	10	24,2	10	14,2	360,8	180,8	0,706	0,2747308
	19	3	10	24,2	10	14,2	385	195	0,68	0,2618
	20	3	10	24,2	10	14,2	409,2	209,2	0,654	0,2494516
	21	3	10	24,2	10	14,2	433,4	223,4	0,628	0,2375746

Calcul CSR Sondage N°06

Lithologie	Z (m)	amax (m/s ²)	g (m/s ²)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	rd	CSR
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	3	10	16,6	10	6,6	16,6	6,6	0,99235	0,4867026
	2	3	10	16,6	10	6,6	33,2	13,2	0,9847	0,4829506
	3	3	10	16,6	10	6,6	49,8	19,8	0,97705	0,4791986
	4	3	10	16,6	10	6,6	66,4	26,4	0,9694	0,4754466
	5	3	10	16,6	10	6,6	83	33	0,96175	0,4716947
	6	3	10	16,6	10	6,6	99,6	39,6	0,9541	0,4679427
	7	3	10	16,6	10	6,6	116,2	46,2	0,94645	0,4641907
	8	3	10	16,6	10	6,6	132,8	52,8	0,9388	0,4604387
	9	3	10	16,6	10	6,6	149,4	59,4	0,93115	0,4566868
	10	3	10	16,6	10	6,6	166	66	0,914	0,4482755
	11	3	10	16,6	10	6,6	182,6	72,6	0,888	0,4355236
	12	3	10	16,6	10	6,6	199,2	79,2	0,862	0,4227718
	13	3	10	16,6	10	6,6	215,8	85,8	0,836	0,41002
	14	3	10	16,6	10	6,6	232,4	92,4	0,81	0,3972682

Calcul CSR Sondage N°07

Lithologie	Z (m)	amax (m/s ²)	g (m/s ²)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	rd	CSR
Sable fin jaunâtre	1	3	10	16,6	10	6,6	16,6	6,6	0,99235	0,4867026
	2	3	10	16,6	10	6,6	33,2	13,2	0,9847	0,4829506
	3	3	10	16,6	10	6,6	49,8	19,8	0,97705	0,4791986
	4	3	10	16,6	10	6,6	66,4	26,4	0,9694	0,4754466
	5	3	10	16,6	10	6,6	83	33	0,96175	0,4716947
	6	3	10	16,6	10	6,6	99,6	39,6	0,9541	0,4679427
	7	3	10	16,6	10	6,6	116,2	46,2	0,94645	0,4641907
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	8	3	10	19,5	10	9,5	135,7	55,7	0,9388	0,4459974
	9	3	10	19,5	10	9,5	155,2	65,2	0,93115	0,4322136
	10	3	10	19,5	10	9,5	174,7	74,7	0,914	0,4168244
	11	3	10	19,5	10	9,5	194,2	84,2	0,888	0,3993785
	12	3	10	19,5	10	9,5	213,7	93,7	0,862	0,38336
	13	3	10	19,5	10	9,5	233,2	103,2	0,836	0,3683747
	14	3	10	19,5	10	9,5	252,7	112,7	0,81	0,3541612
Marne grise claire	15	3	10	19,5	10	9,5	272,2	122,2	0,784	0,3405396
	16	3	10	23,2	10	13,2	295,4	135,4	0,758	0,3224747
	17	3	10	23,2	10	13,2	318,6	148,6	0,732	0,3060361
	18	3	10	23,2	10	13,2	341,8	161,8	0,706	0,2908257
	19	3	10	23,2	10	13,2	365	175	0,68	0,2765657
	20	3	10	23,2	10	13,2	388,2	188,2	0,654	0,263056
	21	3	10	23,2	10	13,2	411,4	201,4	0,628	0,2501492

Calcul CSR Sondage N°08

Lithologie	Z (m)	amax (m/s ²)	g (m/s ²)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	rd	CSR
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	3	10	16,6	10	6,6	16,6	6,6	0,99235	0,4867026
	2	3	10	16,6	10	6,6	33,2	13,2	0,9847	0,4829506
	3	3	10	16,6	10	6,6	49,8	19,8	0,97705	0,4791986
	4	3	10	16,6	10	6,6	66,4	26,4	0,9694	0,4754466
Sable fin gris verdâtre peu argileux	5	3	10	16,6	10	6,6	83	33	0,96175	0,4716947
	6	3	10	16,6	10	6,6	99,6	39,6	0,9541	0,4679427
	7	3	10	16,6	10	6,6	116,2	46,2	0,94645	0,4641907
	8	3	10	16,6	10	6,6	132,8	52,8	0,9388	0,4604387
	9	3	10	16,6	10	6,6	149,4	59,4	0,93115	0,4566868
	10	3	10	16,6	10	6,6	166	66	0,914	0,4482755
	11	3	10	16,6	10	6,6	182,6	72,6	0,888	0,4355236
	12	3	10	16,6	10	6,6	199,2	79,2	0,862	0,4227718
	13	3	10	16,6	10	6,6	215,8	85,8	0,836	0,41002
	14	3	10	16,6	10	6,6	232,4	92,4	0,81	0,3972682

Calcul CSR Sondage N°09

Lithologie	Z (m)	amax (m/s ²)	g (m/s ²)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	rd	CSR
Sable fin jaunâtre	1	3	10	16,6	10	6,6	16,6	6,6	0,99235	0,4867026
	2	3	10	16,6	10	6,6	33,2	13,2	0,9847	0,4829506
	3	3	10	16,6	10	6,6	49,8	19,8	0,97705	0,4791986
	4	3	10	16,6	10	6,6	66,4	26,4	0,9694	0,4754466
	5	3	10	16,6	10	6,6	83	33	0,96175	0,4716947
	6	3	10	16,6	10	6,6	99,6	39,6	0,9541	0,4679427
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	7	3	10	19,5	10	9,5	119,1	49,1	0,94645	0,4476747
	8	3	10	19,5	10	9,5	138,6	58,6	0,9388	0,4329855
	9	3	10	19,5	10	9,5	158,1	68,1	0,93115	0,4215402
	10	3	10	19,5	10	9,5	177,6	77,6	0,914	0,4079078
	11	3	10	19,5	10	9,5	197,1	87,1	0,888	0,3918466
	12	3	10	19,5	10	9,5	216,6	96,6	0,862	0,3768975
	13	3	10	19,5	10	9,5	236,1	106,1	0,836	0,3627618
	14	3	10	19,5	10	9,5	255,6	115,6	0,81	0,3492389
Marne grise claire	15	3	10	23,2	10	13,2	278,8	128,8	0,784	0,3309235
	16	3	10	23,2	10	13,2	302	142	0,758	0,3143565
	17	3	10	23,2	10	13,2	325,2	155,2	0,732	0,2990918
	18	3	10	23,2	10	13,2	348,4	168,4	0,706	0,2848232
	19	3	10	23,2	10	13,2	371,6	181,6	0,68	0,2713335
	20	3	10	23,2	10	13,2	394,8	194,8	0,654	0,2584643
	21	3	10	23,2	10	13,2	418	208	0,628	0,2460975

Calcul CSR Sondage N°10

Lithologie	Z (m)	amax (m/s ²)	g (m/s ²)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ' (KN/m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	rd	CSR
Sable fin rougeâtre graveleux	1	3	10	16,6	10	6,6	16,6	6,6	0,99235	0,4867026
	2	3	10	16,6	10	6,6	33,2	13,2	0,9847	0,4829506
Sable fin jaunâtre	3	3	10	16,6	10	6,6	49,8	19,8	0,97705	0,4791986
	4	3	10	16,6	10	6,6	66,4	26,4	0,9694	0,4754466
	5	3	10	16,6	10	6,6	83	33	0,96175	0,4716947
	6	3	10	16,6	10	6,6	99,6	39,6	0,9541	0,4679427
	7	3	10	16,6	10	6,6	116,2	46,2	0,94645	0,4641907
	8	3	10	16,6	10	6,6	132,8	52,8	0,9388	0,4604387
	9	3	10	16,6	10	6,6	149,4	59,4	0,93115	0,4566868
	10	3	10	16,6	10	6,6	166	66	0,914	0,4482755
	11	3	10	16,6	10	6,6	182,6	72,6	0,888	0,4355236
	12	3	10	16,6	10	6,6	199,2	79,2	0,862	0,4227718
13	3	10	16,6	10	6,6	215,8	85,8	0,836	0,41002	
Marne grise bleuâtre indurée avec des cassures conchoïdales d'aspect rocheux	14	3	10	23,6	10	13,6	239,4	99,4	0,81	0,3804148

Calcul CRR Sondage N°01

Z (m)	γ KN/ m ³	γ_w KN/ m ³	γ' KN/ m ³	σ KPa	σ' KPa	Pa KPa	qc KPa	fs KPa	Q	F	Ic	n	Q	Ic	n	Q	qc1n	Ic	Kc	qc1n (cs)	CRR	Typ de sol
1	16,6	10	6,6	16,6	6,6	100	4540	198,67	685,36	4,39%	0,65	0,5	176,07	1,23	0,5	176,07	176,07	1,23	1	176,0	0,588	7
2	16,6	10	6,6	33,2	13,2	100	5910	390	445,21	6,64%	0,82	0,5	161,75	1,26	0,5	161,75	161,75	1,26	1	161,7	0,474	7
3	16,6	10	6,6	49,8	19,8	100	5080	966	254,05	19,20%	1,18	0,5	113,05	1,50	0,5	113,05	113,05	1,50	1	113,0	0,214	7
4	16,6	10	6,6	66,4	26,4	100	4050	1208,6	150,89	30,34%	1,47	0,5	77,53	1,73	0,5	77,53	77,53	1,73	1,05	81,60	0,131	6
5	16,6	10	6,6	83	33	100	3090	1166,6	91,12	38,80%	1,71	0,5	52,35	1,93	0,5	52,35	52,35	1,93	1,21	63,34	0,104	6
6	16,6	10	6,6	99,6	39,6	100	3500	695,33	85,87	20,45%	1,63	0,5	54,04	1,82	0,5	54,04	54,04	1,82	1,11	60,14	0,100	6
7	16,6	10	6,6	116,2	46,2	100	6530	1233,3	138,83	19,23%	1,42	0,5	94,36	1,58	0,5	94,36	94,36	1,58	1	94,36	0,158	6
8	16,6	10	6,6	132,8	52,8	100	1013	1058,0	189,34	10,58%	1,22	0,5	137,58	1,35	0,5	137,58	137,58	1,35	1	137,5	0,322	7
9	16,6	10	6,6	149,4	59,4	100	4200	2466,0	68,19	60,88%	1,92	0,5	52,56	2,02	0,5	52,56	52,56	2,02	1,31	69,11	0,111	6
10	19,5	10	9,5	168,9	68,9	100	2140	1253,3	28,61	63,59%	2,26	0,5	23,75	2,33	0,5	23,75	23,75	2,33	2,04	48,44	0,090	5
11	19,5	10	9,5	188,4	78,4	100	5250	2054,6	64,56	40,59%	1,86	0,5	57,16	1,90	0,5	57,16	57,16	1,90	1,18	67,71	0,109	6
12	19,5	10	9,5	207,9	87,9	100	3320	1480,0	35,41	47,56%	2,12	0,5	33,19	2,15	0,5	33,19	33,19	2,15	1,53	50,90	0,092	5
13	19,5	10	9,5	227,4	97,4	100	6320	2208,0	62,55	36,24%	1,85	0,5	61,73	1,85	0,5	61,73	61,73	1,85	1,14	70,37	0,112	6
14	19,5	10	9,5	246,9	106,9	100	8570	1472,0	77,86	17,69%	1,65	0,5	80,50	1,63	0,5	80,50	80,50	1,63	1	80,50	0,129	6
15	19,5	10	9,5	266,4	116,4	100	1950	3099,3	14,46	184,09	2,75	chin										4
16	19,5	10	9,5	285,9	125,9	100	2215	2365,0	15,32	122,60	2,63	chin										4
17	19,5	10	9,5	305,4	135,4	100	790	3532,6	3,58	728,99	3,58	chin										3
18	19,5	10	9,5	324,9	144,9	100	690	1662,0	2,52	455,22	3,60	chin										3
19	19,5	10	9,5	344,4	154,4	100	2000	3390,6	10,72	204,80	2,88	chin										4
20	19,5	10	9,5	363,9	163,9	102	1220	1952,0	5,22	228,01	3,17	chin										3
21	23,2	10	13,2	387,1	177,1	104	3254	6251,3	16,19	218,05	2,75	chin										4

Calcul CRR Sondage N°02

Z (m)	γ (KN/ m ³)	γ_w (KN/ m ³)	γ' (KN/ m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	Pa (KPa)	qc (KPa)	fs (KPa)	Q	F	Ic	n	Q	Ic	n	Q	qc1n	Ic	Kc	qc1n (cs)	CRR	Typ de sol
1	16,6	10	6,6	16,6	6,6	100	7460	372	1127,79	5,00%	0,43	0,5	289,73	1,01	0,5	289,73	289,73	1,01	1,00	289,73	2,342	7
2	16,6	10	6,6	33,2	13,2	100	5670	1058	427,03	18,77%	0,97	0,5	155,15	1,37	0,5	155,15	155,15	1,37	1,00	155,15	0,427	7
3	16,6	10	6,6	49,8	19,8	100	4810	639,33	240,41	13,43%	1,14	0,5	106,98	1,48	0,5	106,98	106,98	1,48	1,00	106,98	0,194	7
4	16,6	10	6,6	66,4	26,4	100	4830	1340	180,44	28,13%	1,39	0,5	92,71	1,65	0,5	92,71	92,71	1,65	1,00	92,28	0,153	6
5	16,6	10	6,6	83	33	100	1460	1090,67	41,73	79,21%	2,16	0,5	23,97	2,37	0,5	23,97	23,97	2,37	2,18	52,35	0,093	5
6	16,6	10	6,6	99,6	39,6	100	3320	992,00	81,32	30,80%	1,71	0,5	51,18	1,90	0,5	51,18	51,18	1,90	1,18	60,40	0,100	6
7	16,6	10	6,6	116,2	46,2	100	3610	1045,33	75,62	29,92%	1,74	0,5	51,40	1,89	0,5	51,40	51,40	1,89	1,17	60,36	0,100	6
8	16,6	10	6,6	132,8	52,8	100	5410	879,33	99,95	16,66%	1,54	0,5	72,63	1,67	0,5	72,63	72,63	1,67	1,01	73,47	0,117	6
9	16,6	10	6,6	149,4	59,4	100	4720	1368,00	76,95	29,93%	1,73	0,5	59,30	1,83	0,5	59,30	59,30	1,83	1,13	66,79	0,108	6
10	16,6	10	6,6	166	66	100	4340	977,33	63,24	23,41%	1,77	0,5	51,38	1,86	0,5	51,38	51,38	1,86	1,14	58,73	0,099	6
11	16,6	10	6,6	182,6	72,6	100	4440	1738,67	58,64	40,84%	1,89	0,5	49,97	1,96	0,5	49,97	49,97	1,96	1,24	61,95	0,102	6
12	16,6	10	6,6	199,2	79,2	100	4940	996,67	59,86	21,02%	1,78	0,5	53,27	1,83	0,5	53,27	53,27	1,83	1,12	59,66	0,100	6
13	16,6	10	6,6	215,8	85,8	100	5440	1995,33	60,89	38,19%	1,87	0,5	56,40	1,90	0,5	56,40	56,40	1,90	1,18	66,49	0,107	6
14	16,6	10	6,6	232,4	92,4	100	6860	1176,67	71,73	17,75%	1,68	0,5	68,95	1,70	0,5	68,95	68,95	1,70	1,03	71,11	0,113	6
15	16,6	10	6,6	249	99	100	1520	2815,33	12,84	221,51%	2,83	chin										4
16	19,5	10	9,5	268,5	109	100	920	1320,67	6,00	202,71%	3,09	chin										3
17	19,5	10	9,5	288	118	100	1060	3024	6,54	391,71%	3,21	chin										3
18	19,5	10	9,5	307,5	128	100	1660	1368	10,61	101,15%	2,73	chin										4
19	19,5	10	9,5	327	137	100	850	3256	3,82	622,56%	3,52	chin										3
20	19,5	10	9,5	346,5	147	102	1256	4251	6,21	467,40%	3,28	chin										3
21	23,2	10	13	369,7	160	104	980	3638	3,82	596,10%	3,51	chin										3
22	23,2	11	12	392,9	173	106	2325	2325	11,17	120,34%	2,75	chin										4

Calcul CRR Sondage N°03

Z (m)	γ (KN/ m ³)	γ_w (KN/ m ³)	γ' (KN/ m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	Pa (KPa)	qc (KPa)	fs (KPa)	Q	F	Ic	n	Q	Ic	n	Q	qc1n	Ic	Kc	qc1n (cs)	CRR	Type de sol
1	16,6	10	6,6	16,6	6,6	100	5110	144,67	771,73	2,84%	0,67	0,5	198,26	1,22	0,5	198,26	198,26	1,22	1,00	198,26	0,805	7
2	16,6	10	6,6	33,2	13,2	100	4120	1082	309,61	26,48%	1,17	0,5	112,49	1,56	0,5	112,49	112,49	1,56	1,00	112,49	0,212	7
3	16,6	10	6,6	49,8	19,8	100	4100	212,00	204,56	5,23%	1,16	0,5	91,02	1,51	0,5	91,02	91,02	1,51	1,00	91,02	0,150	7
4	16,6	10	6,6	66,4	26,4	100	4760	1568	177,79	33,41%	1,43	0,5	91,35	1,68	0,5	91,35	91,35	1,68	1,02	93,30	0,156	6
5	16,6	10	6,6	83	33	100	3170	448,00	93,55	14,51%	1,55	0,5	53,74	1,78	0,5	53,74	53,74	1,78	1,09	58,44	0,099	6
6	16,6	10	6,6	99,6	39,6	100	3810	1698,67	93,70	45,78%	1,74	0,5	58,96	1,91	0,5	58,96	58,96	1,91	1,20	70,48	0,113	6
7	16,6	10	6,6	116,2	46,2	100	6040	357,33	128,22	6,03%	1,36	0,5	87,15	1,53	0,5	87,15	87,15	1,53	1,00	87,15	0,142	6
8	16,6	10	6,6	132,8	52,8	100	1740	2224,00	30,44	138,38%	2,41	0,5	22,12	2,52	0,5	22,12	22,12	2,52	2,88	63,59	0,104	5
9	16,6	10	6,6	149,4	59,4	100	6270	333,33	103,04	5,45%	1,46	0,5	79,41	1,57	0,5	79,41	79,41	1,57	1,00	79,41	0,127	6
10	16,6	10	6,6	166	66	100	5770	2249,33	84,91	40,14%	1,75	0,5	68,98	1,83	0,5	68,98	68,98	1,83	1,12	77,33	0,123	6
11	16,6	10	6,6	182,6	72,6	100	4970	388,00	65,94	8,10%	1,66	0,5	56,19	1,73	0,5	56,19	56,19	1,73	1,05	58,98	0,099	6
12	16,6	10	6,6	199,2	79,2	100	4370	2280,67	52,66	54,68%	1,99	0,5	46,87	2,04	0,5	46,87	46,87	2,04	1,34	63,02	0,103	6
13	16,6	10	6,6	215,8	85,8	100	6990	531,33	78,95	7,84%	1,58	0,5	73,13	1,61	0,5	73,13	73,13	1,61	1,00	73,13	0,116	6
14	16,6	10	6,6	232,4	92,4	100	7270	2997,33	76,16	42,59%	1,80	0,5	73,21	1,82	0,5	73,21	73,21	1,82	1,11	81,46	0,130	6
15	23,2	10	13	255,6	106	100	810	1255,33	5,25	226,43%	3,17	chinoi										3
16	23,2	10	13	278,8	119	100	1020	3231,33	6,24	435,96%	3,26	chinoi										3
17	23,2	10	13	302	132	100	1610	1301,3	9,91	99,49%	2,76	chinoi										4
18	23,2	10	13	325,2	145	100	700	3415,3	2,58	911,24%	3,76	chinoi										2
19	23,2	10	13	348,4	158	100	920	1359,3	3,61	237,81%	3,32	chinoi										3
20	23,2	10	13	371,6	172	100	400	3539,3	0,17	12462,44%	5,39	chinoi										2
21	23,2	10	13	394,8	185	100	610	1944,7	1,16	903,66%	4,04	chinoi										2

ANNEXES

Calcul CRR Sondage N°04

Z (m)	γ (KN/ m ³)	γ_w (KN/ m ³)	γ' (KN/ m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	Pa (KPa)	qc (KPa)	fs (KPa)	Q	F	Ic	n	Q	Ic	n	qc1n	Ic	Kc	qc1n(cs)	CRR	Type de sol
1	16,6	10	6,6	16,6	6,6	100	6895	204,67	1042,18	2,98%	0,55	0,5	267,74	1,09	0,5	267,74	1,09	1,00	267,74	1,86	7
2	16,6	10	6,6	33,2	13,2	100	6625	1250	499,38	18,96%	0,92	0,5	181,43	1,31	0,5	181,43	1,31	1,00	181,43	0,64	7
3	16,6	10	6,6	49,8	19,8	100	4570	443,33	228,29	9,81%	1,13	0,5	101,58	1,48	0,5	101,58	1,48	1,00	101,58	0,18	7
4	16,6	10	6,6	66,4	26,4	100	3660	1848,7	136,12	51,44%	1,63	0,5	69,94	1,87	0,5	69,94	1,87	1,16	80,99	0,13	6
5	16,6	10	6,6	83	33	100	3620	665,33	107,18	18,81%	1,52	0,5	61,57	1,75	0,5	61,57	1,75	1,07	65,73	0,11	6
6	16,6	10	6,6	99,6	39,6	100	4570	1752,67	112,89	39,21%	1,63	0,5	71,04	1,81	0,5	71,04	1,81	1,11	78,79	0,13	6
7	16,6	10	6,6	116,2	46,2	100	6080	597,33	129,09	10,02%	1,38	0,5	87,74	1,54	0,5	87,74	1,54	1,00	87,74	0,14	6
8	16,6	10	6,6	132,8	52,8	100	7300	1534,67	135,74	21,41%	1,45	0,5	98,64	1,58	0,5	98,64	1,58	1,00	98,64	0,17	6
9	16,6	10	6,6	149,4	59,4	100	2514	1882,00	39,81	79,59%	2,18	0,5	30,68	2,28	0,5	30,68	2,28	1,87	57,32	0,10	5
10	21	10	11	170,4	70,4	100	1600	1672,00	20,31	116,96%	2,52	0,5	17,04	2,58	0,5	17,04	2,58	3,21	54,61	0,10	5
11	21	10	11	191,4	81,4	100	3820	1105,33	44,58	30,46%	1,95	0,5	40,22	1,99	0,5	40,22	1,99	1,28	51,65	0,09	6
12	24,2	10	14	215,6	95,6	100	4820	2156,67	48,16	46,84%	2,00	0,5	47,09	2,01	0,5	47,09	2,01	1,30	61,19	0,10	6
13	24,2	10	14	239,8	110	100	5970	1040,00	52,19	18,15%	1,82	0,5	54,69	1,80	0,5	54,69	1,80	1,10	60,09	0,10	6
14	24,2	10	14	264	124	100	5170	2776,00	39,56	56,58%	2,11	0,5	44,06	2,07	0,5	44,06	2,07	1,39	61,34	0,10	5
15	24,2	10	14	288,2	138	100	1050	1578,00	5,51	207,14%	3,13	chinoi									3
16	24,2	10	14	312,4	152	100	1510	3060,00	7,86	255,51%	3,05	chinoi									3
17	24,2	10	14	336,6	167	100	415	1457,3	0,47	1858,84%	4,54	chinoi									2
18	24,2	10	14	360,8	181	100	870	3624,7	2,82	711,84%	3,66	chinoi									2
19	24,2	10	14	385	195	100	415	1371,3	0,15	4571,11%	5,16	chinoi									2
20	24,2	10	14	409,2	209	102	510	4135,3	0,48	4102,51%	4,73	chinoi									2
21	24,2	10	14	433,4	223	104	650	1472,7	0,97	679,90%	4,04	chinoi									2

Calcul CRR Sondage N°06

Z (m)	γ (KN/ m ³)	γ_w (KN/ m ³)	γ' (KN/ m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	Pa (KPa)	qc (KPa)	fs (KPa)	Q	F	Ic	n	Q	Ic	n	Q	qc1n	Ic	Kc	qc1n(cs)	CRR	Type de sol
1	16,6	10	6,6	16,6	6,6	100	5080	210,67	767,18	4,16%	0,61	0,5	197,09	1,19	0,5	197,09	197,09	1,19	1,00	197,09	0,792	7
2	16,6	10	6,6	33,2	13,2	100	8040	721,33	606,58	9,01%	0,71	0,5	220,38	1,14	0,5	220,38	220,38	1,14	1,00	220,38	1,075	7
3	16,6	10	6,6	49,8	19,8	100	7895	876,67	396,22	11,17%	0,91	0,5	176,31	1,25	0,5	176,31	176,31	1,25	1,00	176,31	0,590	7
4	16,6	10	6,6	66,4	26,4	100	7140	1291,3	267,94	18,26%	1,15	0,5	137,67	1,42	0,5	137,67	137,67	1,42	1,00	137,67	0,323	7
5	16,6	10	6,6	83	33	100	4820	1334,67	143,55	28,18%	1,47	0,5	82,46	1,69	0,5	82,46	82,46	1,69	1,03	84,74	0,137	6
6	16,6	10	6,6	99,6	39,6	100	4520	1320,00	111,63	29,86%	1,58	0,5	70,24	1,77	0,5	70,24	70,24	1,77	1,08	75,66	0,120	6
7	16,6	10	6,6	116,2	46,2	100	3524	1412,00	73,76	41,43%	1,81	0,5	50,14	1,96	0,5	50,14	50,14	1,96	1,24	62,23	0,102	6
8	16,6	10	6,6	132,8	52,8	100	3440	1836,67	62,64	55,54%	1,93	0,5	45,51	2,05	0,5	45,51	45,51	2,05	1,37	62,19	0,102	6
9	16,6	10	6,6	149,4	59,4	100	7520	1525,33	124,08	20,69%	1,48	0,5	95,63	1,58	0,5	95,63	95,63	1,58	1,00	95,63	0,161	6
10	16,6	10	6,6	166	66	100	3940	2608,00	57,18	69,10%	2,01	0,5	46,45	2,09	0,5	46,45	46,45	2,09	1,43	66,43	0,107	6
11	16,6	10	6,6	182,6	72,6	100	7610	1363,33	102,31	18,36%	1,54	0,5	87,17	1,60	0,5	87,17	87,17	1,60	1,00	87,17	0,142	6
12	16,6	10	6,6	199,2	79,2	100	10180	3374,00	126,02	33,80%	1,56	0,5	112,15	1,61	0,5	112,15	112,15	1,61	1,00	112,15	0,211	6
13	16,6	10	6,6	215,8	85,8	100	6200	2212,67	69,75	36,98%	1,81	0,5	64,60	1,84	0,5	64,60	64,60	1,84	1,13	72,92	0,116	6
14	16,6	10	6,6	232,4	92,4	100	5540	3418,00	57,44	64,40%	2,00	0,5	55,22	2,01	0,5	55,22	55,22	2,01	1,31	72,14	0,115	6

ANNEXES

Calcul CRR Sondage N°07

Z (m)	γ (KN/ m ³)	γ_w (KN/ m ³)	γ' (KN/ m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	Pa (KPa)	qc (KPa)	fs (KPa)	Q	F	Ic	n	Q	Ic	n	Q	qc1n	Ic	Kc	qc1n(cs)	CRR	Type de sol
1	16,6	10	6,6	16,6	6,6	100	5070	41,333	765,67	0,82%	1,05	0,5	196,70	1,46	0,5	196,70	196,70	1,46	1,00	196,70	0,788	7
2	16,6	10	6,6	33,2	13,2	100	7200	319,33	542,94	4,46%	0,75	0,5	197,26	1,18	0,5	197,26	197,26	1,18	1,00	197,26	0,794	7
3	16,6	10	6,6	49,8	19,8	100	3310	934,00	164,66	28,65%	1,42	0,5	73,27	1,74	0,5	73,27	73,27	1,74	1,06	77,73	0,124	6
4	16,6	10	6,6	66,4	26,4	100	550	529,33	18,32	109,46%	2,54	0,5	9,41	2,80	0,7	12,28	12,28	2,69	3,93	48,24	0,090	5
5	16,6	10	6,6	83	33	100	3250	1222,00	95,97	38,59%	1,69	0,5	55,13	1,91	0,5	55,13	55,13	1,91	1,19	65,55	0,106	6
6	16,6	10	6,6	99,6	39,6	100	3730	543,33	91,68	14,97%	1,56	0,5	57,69	1,75	0,5	57,69	57,69	1,75	1,07	61,67	0,102	6
7	16,6	10	6,6	116,2	46,2	100	3500	1487,33	73,24	43,95%	1,82	0,5	49,78	1,97	0,5	49,78	49,78	1,97	1,26	62,59	0,103	6
8	19,5	10	9,5	135,7	55,7	100	3680	798,00	63,63	22,52%	1,76	0,5	47,49	1,88	0,5	47,49	47,49	1,88	1,17	55,38	0,096	6
9	19,5	10	9,5	155,2	65,2	100	4602	1608,67	68,20	36,18%	1,81	0,5	55,07	1,90	0,5	55,07	55,07	1,90	1,18	64,90	0,105	6
10	19,5	10	9,5	174,7	74,7	100	5860	464,67	76,11	8,17%	1,59	0,5	65,78	1,66	0,5	65,78	65,78	1,66	1,00	66,04	0,107	6
11	19,5	10	9,5	194,2	84,2	100	6270	1765,33	72,16	29,06%	1,75	0,5	66,21	1,78	0,5	66,21	66,21	1,78	1,09	72,18	0,115	6
12	19,5	10	9,5	213,7	93,7	100	6300	340,67	64,96	5,60%	1,66	0,5	62,88	1,67	0,5	62,88	62,88	1,67	1,01	63,75	0,104	6
13	19,5	10	9,5	233,2	103	100	5180	2000,00	47,93	40,43%	1,97	0,5	48,70	1,96	0,5	48,70	48,70	1,96	1,25	60,83	0,101	6
14	19,5	10	9,5	252,7	113	100	7040	660,00	60,22	9,72%	1,70	0,5	63,93	1,68	0,5	63,93	63,93	1,68	1,02	65,06	0,106	6
15	19,5	10	9,5	272,2	122	100	5250	2559,33	40,73	51,41%	2,08	0,5	45,03	2	0,5	45,03	45,03	2	1,3	60,755	0,101	5
16	23,2	10	13	295,4	135	100	1460	1293,33	8,60	111,05%	2,83	chinoi										4
17	23,2	10	13	318,6	149	100	2570	2864	15,15	127,21%	2,65	chinoi										4
18	23,2	10	13	341,8	162	100	1240	1500	5,55	167,00%	3,08	chinoi										3
19	23,2	10	13	365	175	100	830	3170	2,66	681,72%	3,67	chinoi										2
20	23,2	10	13	388,2	188	102	1760	1734,7	7,29	126,45%	2,92	chinoi										4
21	23,2	10	13	411,4	201	104	640	3281,3	1,14	1435,40%	4,16	chinoi										2

Calcul CRR Sondage N°08

Z (m)	γ (KN/ m ³)	γ_w (KN/ m ³)	γ' (KN/ m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	Pa (KPa)	qc (KPa)	fs (KPa)	Q	F	Ic	n	Q	Ic	n	Q	qc1n	Ic	Kc	qc1n(cs)	CRR	Type de sol
1	16,6	10	6,6	16,6	6,6	100	4854	212,67	732,94	4,40%	0,62	0,5	188,30	1,20	0,5	188,30	188,30	1,20	1,00	188,30	0,701	7
2	16,6	10	6,6	33,2	13,2	100	9584	432,67	723,55	4,53%	0,62	0,5	262,88	1,06	0,5	262,88	262,88	1,06	1,00	262,88	1,769	7
3	16,6	10	6,6	49,8	19,8	100	7060	1385,33	354,05	19,76%	1,06	0,5	157,54	1,37	0,5	157,54	157,54	1,37	1,00	157,54	0,444	7
4	16,6	10	6,6	66,4	26,4	100	8360	806	314,15	9,72%	0,99	0,5	161,41	1,28	0,5	161,41	161,41	1,28	1,00	161,41	0,471	7
5	16,6	10	6,6	83	33	100	9190	1732,00	275,97	19,02%	1,14	0,5	158,53	1,36	0,5	158,53	158,53	1,36	1,00	158,53	0,451	7
6	16,6	10	6,6	99,6	39,6	100	6470	1213,33	160,87	19,05%	1,36	0,5	101,23	1,55	0,5	101,23	101,23	1,55	1,00	101,23	0,176	6
7	16,6	10	6,6	116,2	46,2	100	4800	1474,67	101,38	31,48%	1,63	0,5	68,91	1,78	0,5	68,91	68,91	1,78	1,09	75,02	0,119	6
8	16,6	10	6,6	132,8	52,8	100	5970	1433,33	110,55	24,56%	1,55	0,5	80,33	1,68	0,5	80,33	80,33	1,68	1,02	81,89	0,131	6
9	16,6	10	6,6	149,4	59,4	100	14253	1499,33	237,43	10,63%	1,12	0,5	182,99	1,23	0,5	182,99	182,99	1,23	1,00	182,99	0,650	7
10	16,6	10	6,6	166	66	100	4590	2955,33	67,03	66,80%	1,95	0,5	54,46	2,02	0,5	54,46	54,46	2,02	1,32	72,15	0,115	6
11	16,6	10	6,6	182,6	72,6	100	8870	1828,00	119,66	21,04%	1,49	0,5	101,96	1,56	0,5	101,96	101,96	1,56	1,00	101,96	0,179	6
12	16,6	10	6,6	199,2	79,2	100	7940	2964,67	97,74	38,30%	1,68	0,5	86,98	1,73	0,5	86,98	86,98	1,73	1,05	91,49	0,151	6
13	16,6	10	6,6	215,8	85,8	100	2550	2594,67	27,21	111,16%	2,40	0,5	25,20	2,43	0,5	25,20	25,20	2,43	2,40	60,58	0,101	5
14	16,6	10	6,6	232,4	92,4	100	7650	2895,33	80,28	39,03%	1,76	0,5	77,17	1,78	0,5	77,17	77,17	1,78	1,09	83,78	0,135	6

Calcul CRR Sondage N°09

Z (m)	γ (KN/ m ³)	γ_w (KN/ m ³)	γ' (KN/ m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	Pa (KPa)	qc (KPa)	fs (KPa)	Q	F	Ic	n	Q	Ic	n	Q	qc1n	Ic	Kc	qc1n(cs)	CRR	Type de sol
1	16,6	10	6,6	16,6	6,6	100	4895	84	739,15	1,72%	0,81	0,5	189,89	1,31	0,5	189,89	189,89	1,31	1,00	189,89	0,717	7
2	16,6	10	6,6	33,2	13,2	100	6859	548	517,11	8,03%	0,77	0,5	187,87	1,20	0,5	187,87	187,87	1,20	1,00	187,87	0,697	7
3	16,6	10	6,6	49,8	19,8	100	4140	624,00	206,58	15,26%	1,22	0,5	91,92	1,56	0,5	91,92	91,92	1,56	1,00	91,92	0,152	7
4	16,6	10	6,6	66,4	26,4	100	4180	744	155,82	18,09%	1,36	0,5	80,06	1,64	0,5	80,06	80,06	1,64	1,00	80,06	0,128	6
5	16,6	10	6,6	83	33	100	2820	1012,67	82,94	37,00%	1,74	0,5	47,65	1,96	0,5	47,65	47,65	1,96	1,24	59,12	0,099	6
6	16,6	10	6,6	99,6	39,6	100	3510	930,67	86,12	27,29%	1,67	0,5	54,19	1,86	0,5	54,19	54,19	1,86	1,14	61,97	0,102	6
7	19,5	10	9,5	119,1	49,1	100	1700	1188,67	32,20	75,19%	2,25	0,5	22,56	2,38	0,5	22,56	22,56	2,38	2,23	50,39	0,092	5
8	19,5	10	9,5	138,6	58,6	100	5800	1144,00	96,61	20,21%	1,58	0,5	73,96	1,69	0,5	73,96	73,96	1,69	1,02	75,65	0,120	6
9	19,5	10	9,5	158,1	68,1	100	1680	1401,33	22,35	92,08%	2,43	0,5	18,44	2,50	0,5	18,44	18,44	2,50	2,76	50,97	0,092	5
10	19,5	10	9,5	177,6	77,6	100	4660	954,67	57,76	21,30%	1,79	0,5	50,88	1,85	0,5	50,88	50,88	1,85	1,14	57,81	0,098	6
11	19,5	10	9,5	197,1	87,1	100	5560	1716,00	61,57	32,00%	1,83	0,5	57,46	1,86	0,5	57,46	57,46	1,86	1,15	65,81	0,107	6
12	19,5	10	9,5	216,6	96,6	100	7050	956,67	70,74	14,00%	1,66	0,5	69,53	1,67	0,5	69,53	69,53	1,67	1,01	70,34	0,112	6
13	19,5	10	9,5	236,1	106	100	5390	1992,00	48,58	38,65%	1,96	0,5	50,04	1,95	0,5	50,04	50,04	1,95	1,23	61,45	0,102	6
14	19,5	10	9,5	255,6	116	100	1060	2045,33	6,96	254,27%	3,09	chinoi										3
15	23,2	10	13	278,8	129	100	854	1820,00	4,47	316,41%	3,30	chinoi										3
16	23,2	10	13	302	142	100	970	2456,67	4,70	367,76%	3,32	chinoi										3
17	23,2	10	13	325,2	155	100	1150	2062,7	5,31	250,08%	3,19	chinoi										3
18	23,2	10	13	348,4	168	100	2154	2556	10,72	141,56%	2,80	chinoi										4
19	23,2	10	13	371,6	182	100	2153	2690	9,81	151,00%	2,85	chinoi										4
20	23,2	10	13	394,8	195	102	750	3169,3	1,82	892,27%	3,87	chinoi										2
21	23,2	10	13	418	208	104	890	2767,3	2,27	586,30%	3,69	chinoi										2

Calcul CRR Sondage N°10

Z (m)	γ (KN/ m ³)	γ_w (KN/ m ³)	γ' (KN/ m ³)	σ (KPa)	σ' (KPa)	Pa (KPa)	qc (KPa)	fs (KPa)	Q	F%	Ic	n	Q	Ic	n	Q	qc1n	Ic	Kc	qc1n(cs)	CRR	Typ de sol
1	16,6	10	6,6	16,6	6,6	100	5430	450,67	820,21	8,33	0,57	0,5	210,72	1,15	0,5	210,72	210,72	1,15	1,00	210,72	0,950	7
2	16,6	10	6,6	33,2	13,2	100	4260	1104	320,21	26,12	1,16	0,5	116,34	1,54	0,5	116,34	116,34	1,54	1,00	116,34	0,226	7
3	16,6	10	6,6	49,8	19,8	100	15800	696,67	795,46	4,42	0,58	0,5	353,96	0,93	0,5	353,96	353,96	0,93	1,00	353,96	4,204	7
4	16,6	10	6,6	66,4	26,4	100	9300	1937,3	349,76	20,98	1,07	0,5	179,71	1,33	0,5	179,71	179,71	1,33	1,00	179,71	0,620	7
5	16,6	10	6,6	83	33	100	11870	724,00	357,18	6,14	0,92	0,5	205,19	1,16	0,5	205,19	205,19	1,16	1,00	205,19	0,883	7
6	16,6	10	6,6	99,6	39,6	100	4700	2704,67	116,17	58,79	1,72	0,5	73,11	1,89	0,5	73,11	73,11	1,89	1,17	85,50	0,138	6
7	16,6	10	6,6	116,2	46,2	100	2160	659,33	44,24	32,26	1,96	0,5	30,07	2,12	0,5	30,07	30,07	2,12	1,48	44,64	0,087	6
8	16,6	10	6,6	132,8	52,8	100	3680	2352,00	67,18	66,31	1,95	0,5	48,82	2,06	0,5	48,82	48,82	2,06	1,38	67,55	0,109	6
9	16,6	10	6,6	149,4	59,4	100	8760	683,33	144,96	7,94	1,31	0,5	111,72	1,43	0,5	111,72	111,72	1,43	1,00	111,72	0,210	6
10	16,6	10	6,6	166	66	100	8600	2590,67	127,79	30,72	1,54	0,5	103,82	1,62	0,5	103,82	103,82	1,62	1,00	103,82	0,184	6
11	16,6	10	6,6	182,6	72,6	100	8360	1954,67	112,64	23,90	1,54	0,5	95,97	1,60	0,5	95,97	95,97	1,60	1,00	95,97	0,162	6
12	16,6	10	6,6	199,2	79,2	100	7900	2899,33	97,23	37,65	1,68	0,5	86,53	1,73	0,5	86,53	86,53	1,73	1,05	90,94	0,150	6
13	16,6	10	6,6	215,8	85,8	100	8550	2190,67	97,14	26,29	1,61	0,5	89,97	1,65	0,5	89,97	89,97	1,65	1,00	89,57	0,147	6
14	23,6	10	13,6	239,4	99,4	100	11600	3000,67	114,29	26,41	1,55	0,5	113,95	1,55	0,5	113,95	113,95	1,55	1,00	113,95	0,218	6

Calcul FS Sondage S01

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	F _s	Liquéfaction
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	0,487	0,588	1,207	liquéfaction
	2	0,483	0,474	0,981	liquéfaction
	3	0,479	0,214	0,447	liquéfaction
	4	0,475	0,131	0,275	liquéfaction
	5	0,472	0,104	0,220	liquéfaction
	6	0,468	0,100	0,214	liquéfaction
	7	0,464	0,158	0,341	liquéfaction
	8	0,460	0,322	0,700	liquéfaction
	9	0,457	0,111	0,242	liquéfaction
Sable fin verdâtre à gris claire argileux carbonaté	10	0,437	0,090	0,207	liquéfaction
	11	0,416	0,109	0,262	liquéfaction
	12	0,398	0,092	0,232	liquéfaction
	13	0,381	0,112	0,295	liquéfaction
	14	0,365	0,129	0,352	liquéfaction
	15	couches argileuses ne sont pas sensibles à la liquéfaction.			
	16				
	17				
	18				
	19				
20					
Marne grise claire	21				

Calcul FS Sondage S02

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	Fs	Liquéfaction
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	0,487	2,342	4,812	Non liquéfaction
	2	0,483	0,427	0,885	liquéfaction
	3	0,479	0,194	0,405	liquéfaction
	4	0,475	0,153	0,322	liquéfaction
	5	0,472	0,093	0,198	liquéfaction
	6	0,468	0,100	0,215	liquéfaction
	7	0,464	0,100	0,216	liquéfaction
	8	0,460	0,117	0,254	liquéfaction
	9	0,457	0,108	0,236	liquéfaction
	10	0,448	0,099	0,220	liquéfaction
	11	0,436	0,102	0,234	liquéfaction
	12	0,423	0,100	0,236	liquéfaction
	13	0,410	0,107	0,262	liquéfaction
	14	0,397	0,113	0,286	liquéfaction
	15	couches argileuses ne sont pas sensibles à la liquéfaction.			
Marne finement sableuse grise verdâtre	16				
	17				
	18				
	19				
20					
Marne grise claire indurée avec des cassures conchoïda les	21				
	22				

Calcul FS Sondage S03

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	Fs	Liquéfaction
Sable fin jaunâtre	1	0,487	0,805	1,653	Non liquéfaction
	2	0,483	0,212	0,440	liquéfaction
	3	0,479	0,150	0,313	liquéfaction
	4	0,475	0,156	0,327	liquéfaction
	5	0,472	0,099	0,209	liquéfaction
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	6	0,468	0,113	0,241	liquéfaction
	7	0,464	0,142	0,305	liquéfaction
	8	0,460	0,104	0,226	liquéfaction
	9	0,457	0,127	0,277	liquéfaction
	10	0,448	0,123	0,274	liquéfaction
	11	0,436	0,099	0,227	liquéfaction
	12	0,423	0,103	0,244	liquéfaction
	13	0,410	0,116	0,284	liquéfaction
Marne grise claire	14	0,397	0,130	0,328	liquéfaction
	15	couches argileuses ne sont pas sensibles à la liquéfaction.			
	16				
	17				
	18				
	19				
	20				
21					

Calcul FS Sondage S04

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	Fs	Liquéfaction
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	0,487	1,865	3,832	Non liquéfaction
	2	0,483	0,635	1,316	Non liquéfaction
	3	0,479	0,177	0,370	liquéfaction
	4	0,475	0,129	0,272	liquéfaction
	5	0,472	0,106	0,226	liquéfaction
	6	0,468	0,125	0,268	liquéfaction
	7	0,464	0,143	0,308	liquéfaction
	8	0,460	0,169	0,368	liquéfaction
	9	0,457	0,098	0,214	liquéfaction
Grès conglomératique ocre à jaunâtre de moyenne qualité	10	0,431	0,095	0,221	liquéfaction
	11	0,407	0,093	0,228	liquéfaction
Marne grise claire indurée avec des cassures conchoïdales	12	0,379	0,101	0,267	liquéfaction
	13	0,356	0,100	0,281	liquéfaction
	14	0,336	0,101	0,302	liquéfaction
	15	couches argileuses ne sont pas sensibles à la liquéfaction.			
	16				
	17				
	18				
	19				
	20				
	21				

Calcul FS Sondage S06

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	F _s	Liquéfaction
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	0,4867026	0,7920226	1,6273236	Non liquéfaction
	2	0,4829506	1,0754031	2,2267353	Non liquéfaction
	3	0,4791986	0,5896796	1,2305536	liquéfaction
	4	0,4754466	0,3226602	0,6786465	liquéfaction
	5	0,4716947	0,136584	0,2895602	liquéfaction
	6	0,4679427	0,1202725	0,2570239	liquéfaction
	7	0,4641907	0,1024141	0,2206294	liquéfaction
	8	0,4604387	0,1023715	0,2223346	liquéfaction
	9	0,4566868	0,1613414	0,3532869	liquéfaction
	10	0,4482755	0,1072603	0,2392731	liquéfaction
	11	0,4355236	0,1416011	0,3251284	liquéfaction
	12	0,4227718	0,2111871	0,4995298	liquéfaction
	13	0,41002	0,1160547	0,2830463	liquéfaction
	14	0,3972682	0,1149201	0,2892757	liquéfaction

Calcul FS Sondage S07

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	F _s	Liquéfaction
Sable fin jaunâtre	1	0,4867026	0,7878122	1,6186729	Non liquéfaction
	2	0,4829506	0,7938351	1,6437191	Non liquéfaction
	3	0,4791986	0,1236782	0,2580937	liquéfaction
	4	0,4754466	0,090186	0,1896869	liquéfaction
	5	0,4716947	0,1061946	0,2251342	liquéfaction
	6	0,4679427	0,1018088	0,2175668	liquéfaction
	7	0,4641907	0,1028002	0,2214611	liquéfaction
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	8	0,4459974	0,0957971	0,214793	liquéfaction
	9	0,4322136	0,1054229	0,2439139	liquéfaction
	10	0,4168244	0,1067805	0,2561761	liquéfaction
	11	0,3993785	0,1149801	0,2878976	liquéfaction
	12	0,38336	0,1040991	0,2715439	liquéfaction
	13	0,3683747	0,1009307	0,2739892	liquéfaction
	14	0,3541612	0,105612	0,2982031	liquéfaction
	15	0,3405396	0,1008557	0,2961645	liquéfaction
Marne grise claire	16	couches argileuses ne sont pas sensibles à la liquéfaction.			
	17				
	18				
	19				
	20				
	21				

Calcul FS Sondage S08

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	Fs	Liquéfaction
Sable fin jaunâtre carbonaté	1	0,4867026	0,7008734	1,4400	Non liquéfaction
	2	0,4829506	1,7694343	3,6638	Non liquéfaction
	3	0,4791986	0,443644	0,9258	liquéfaction
	4	0,4754466	0,4711167	0,9909	liquéfaction
Sable fin gris verdâtre peu argileux	5	0,4716947	0,4505425	0,9552	liquéfaction
	6	0,4679427	0,1764807	0,3771	liquéfaction
	7	0,4641907	0,119259	0,2569	liquéfaction
	8	0,4604387	0,131073	0,2847	liquéfaction
	9	0,4566868	0,6498929	1,4231	Non liquéfaction
	10	0,4482755	0,1149274	0,2564	liquéfaction
	11	0,4355236	0,1785706	0,4100	liquéfaction
	12	0,4227718	0,1512316	0,3577	liquéfaction
	13	0,41002	0,1006775	0,2455	liquéfaction
	14	0,3972682	0,1346799	0,3390	liquéfaction

Calcul FS Sondage S09

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	Fs	Lliquéfaction
Sable fin jaunâtre	1	0,4867026	0,7167944	1,4728	Non liquéfaction
	2	0,4829506	0,6967125	1,4426	Non liquéfaction
	3	0,4791986	0,1522302	0,3177	liquéfaction
	4	0,4754466	0,1277247	0,2686	liquéfaction
	5	0,4716947	0,0992216	0,2104	liquéfaction
	6	0,4679427	0,1021338	0,2183	liquéfaction
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	7	0,4476747	0,0918957	0,2053	liquéfaction
	8	0,4329855	0,1202675	0,2778	liquéfaction
	9	0,4215402	0,0923122	0,2190	liquéfaction
	10	0,4079078	0,0979673	0,2402	liquéfaction
	11	0,3918466	0,1065045	0,2718	liquéfaction
	12	0,3768975	0,1123657	0,2981	liquéfaction
	13	0,3627618	0,1015789	0,2800	liquéfaction
	14	0,3492389			
Marne grise claire	15	0,3309235			
	16	0,3143565			
	17	0,2990918			
	18	0,2848232			
	19	0,2713335			
	20	0,2584643			
	21	0,2460975			

Calcul FS Sondage S10

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	Fs	Liquéfaction
Sable fin jaunâtre	1	0,4867026	0,7167944	1,4728	Non liquéfaction
	2	0,4829506	0,6967125	1,4426	Non liquéfaction
	3	0,4791986	0,1522302	0,3177	liquéfaction
	4	0,4754466	0,1277247	0,2686	liquéfaction
	5	0,4716947	0,0992216	0,2104	liquéfaction
	6	0,4679427	0,1021338	0,2183	liquéfaction
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	7	0,4476747	0,0918957	0,2053	liquéfaction
	8	0,4329855	0,1202675	0,2778	liquéfaction
	9	0,4215402	0,0923122	0,2190	liquéfaction
	10	0,4079078	0,0979673	0,2402	liquéfaction
	11	0,3918466	0,1065045	0,2718	liquéfaction
	12	0,3768975	0,1123657	0,2981	liquéfaction
	13	0,3627618	0,1015789	0,2800	liquéfaction
Marne grise claire	14	0,3492389			
	15	0,3309235			
	16	0,3143565			
	17	0,2990918			
	18	0,2848232			
	19	0,2713335			
	20	0,2584643			
21	0,2460975				

Calcul FS Sondage S10

Lithologie	Z (m)	CSR	CRR	Fs	Liquéfaction
Sable fin rougeâtre graveleux	1	0,4867026	0,9501165	1,9522	
	2	0,4829506	0,2264391	0,4689	
Sable fin jaunâtre	3	0,4791986	4,2042348	8,7735	
	4	0,4754466	0,619747	1,3035	
	5	0,4716947	0,8833816	1,8728	
	6	0,4679427	0,1381209	0,2952	
	7	0,4641907	0,0871831	0,1878	
	8	0,4604387	0,1086602	0,2360	
	9	0,4566868	0,2096891	0,4592	
	10	0,4482755	0,1840562	0,4106	
	11	0,4355236	0,1622098	0,3724	
	12	0,4227718	0,1499415	0,3547	
	13	0,41002	0,1468383	0,3581	
Marne grise bleuâtre indurée avec des cassures conchoïdales d'aspect rocheux	14	0,3804148	0,2175964	0,5720	

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Ahmadi, M.A. and Paydar, N.A. (2014). "Requirements for soil-specific correlation between shear wave velocity and liquefaction resistance of sands". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 57: 152–163.
2. Aloui T. Géostatistique, cours Faculté des sciences mathématiques physiques et naturelles de Tunis.
3. Andrus, R. D., and Stokoe, K. H. (2000). "Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 11, pp.1015–1025.
4. Ayad F, 2014, "Analyse fiabiliste du potential de liquefaction des sol", these de doctorat, Université Abou bakr Belkaid, Tlemcen
5. Azadi, M. and Mir Mohammed Hosseini, S.M. (2010). " The uplifting behavior of shallow tunnels within the liquefiable soils under cyclic loadings". *Tunnelling and Underground Space Technology* 25: 158–167
6. Benahchilif et Zendagui, (2016)"Assessing of liquefaction in Boumerde (Algeria) using reliability analysis", <http://geomatejournal.com/articles/2016/10/22>.
7. Benahchilif, s, (2004)" Analyse stochastique du potential de la liquefaction" these de Magister, Université Abou Bakr belkaid, Tlemcen.
8. Blake, T. F. (1999). "Guidelines for Analyzing and Mitigating Landslide Hazards in California". Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117. Southern California Earthquake Center University.
9. Davis, R.O. and Berrill, J.B. (1982). "Energy dissipation and seismic liquefaction in sands". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, No. 1, pp. 59-68.
10. Davoodi, M., Jafari, M. K., and Sadroddini, S. M. A. (2013) "Effect of multi-support excitation on seismic response of embankment dams", *International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering* Vol. 11, No. 1 : 19-28
11. Fernandes, A., Lopez-Caballeroa, F., and Costa d'Aguiar, S. (2014). "Probabilistic analysis of numerical simulated railway track global stiffness". *Computers and Geotechnics* 55: 267–276
12. Gilles Guillot. Introduction à la géostatistique, notes de cours, Institut National Agronomique de Paris-Grignon janvier 2004
13. Gutierrez, M., Duncan, J. M., Woods, C., and Eddy, E. (2003). "Development of a simplified reliability-based method for liquefaction evaluation". Final Technical Report, USGS Grant No. 02HQGR0058, Virginia Polytechnic Institute and State University,
14. Holtz, R.D., and Kovacs, W.D. (1991). Introduction à la géotechnique (édition en français traduite par Jean Lafleur). Montréal: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.
15. Hynes, M.E., and Olsen, R. (1998). "Influence of confining stress on liquefaction resistance". *Proceedings in International Symposium on the Physics and Mechanics of Liquefaction*, Balkema, Rotterdam: 145–52.
16. Isobel Clark. Practical Geostatistics, Geostokos limited, Alloa Business Centre, Central Scotland FK 10 3SA
17. Jacques RIVOIRARD. Cours C-17 2 de géostatistique multi variable, Ecole des Mines de Paris, Février 2003.
18. Jafariana, Y., Vakili, R., and Abdollahi, A.S. (2013). "Prediction of cyclic resistance ratio for silty sands and its applications in the simplified liquefaction analysis". *Computers and Geotechnics* 52: 54–62.
19. Juang, C.H., Jiang, T. and Andrus, R.D. (2002). —Assessing probability-based methods for liquefaction evaluation|. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128(7), 580–9.

20. Lenz, J.A., and Baise, L.G. (2007). "Spatial variability of liquefaction potential in regional mapping using CPT and SPT data". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27: 690–702.
21. Martin, G. R., Finn, W. D. L., and Seed, H. B. (1975) "Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading," *J. Geotech., Div. ASCE*, 101(GT5), 423-438.
22. Natacha Kadoux "Analyse des données en mécanique des sol" Thèse, Université Blaise Pascal, Clermont ferrant.
23. Peter M. Byrne et al, liquéfaction and déformation analyses using a total stress approach, *journal of geotechnical an géoenvironmental engeineering*.134(8),2008.
24. Seed H. B., and Idriss I. M. (1971). "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential." *J. Soil Mech. and Found. Div.*, 97(9), 1249–1273
25. Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1982), "Ground motions and soil liquefaction during earthquakes", *Earthquake Engineering Research Institute Monograph Series*.
26. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. Jr., and Chung, R. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, *J. Geotechnical Eng., ASCE* 111(12), 1425–445.
27. Seed, H.B., and Idriss, I. M. (1967). "Analysis of liquefaction: Niigata earthquake." *Proc., ASCE*, 93(SM3), 83-108
28. Shibata, T. (1981). "Relations between N-value and liquefaction potential of sand deposits." *Proc. 16th Annual Convention of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 621-4 (in Japanese)
29. Tokimatsu, K., and Yoshimi, Y. (1983). "Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content." *Soils Found.*, 23(4), 56–74.
30. Uyanık, O., Ekinçi, B. and Uyanık, N.A. (2013). "Liquefaction analysis from seismic velocities and determination of lagoon limits Kumluca/Antalya example". *Journal of Applied Geophysics* 95: 90–103
31. Vaid, Y. P., Byrne, P. M., Hughes, J.M.O. (1981). "Dilation angle and liquefaction potential", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, p. 1003-08; Volume: 107 ;Issue Number: GT7
32. Vaid, Y. P., Fisher, J.M., Kuerbis, R.H. and Negussey, D. (1990). "Particle Gradation and Liquefaction". *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(4), pp. 698-703.
33. Vaid, Y.P., Chen, J. C. et Tumi, H. (1985). "Confining Pressure, Grain Angularity and Liquefaction". *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(10), pp. 1229-1235.
34. Xavier Emery. Géostatistique linéaire, Ecole des mines de Paris 2001.
35. Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe, K. H. (2001). "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils". *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE* 127(10), 817–33.

Sites internet:

fr.m.wikipedia.org

nist.gov/earthquake-kobe-japan-1995

fr.m.wikipedia.org/wiki/seisme/-de-1999-à-Chichi