

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : **Génie Civil** Spécialité : **Géotechnique**

Par : M^{lle} : **Benchirrat Ilham**

M^{lle} : **Betaouaf Samiha**

Sujet

Cartographie du risque de liquéfaction (Etude de cas)

Soutenue, le / / , devant le jury composé de :

M ^f . Ghomari Fouad	Pr	Univ. Tlemcen	Président
M ^{me} . Benahachilif Souad	MCB	Univ. Tlemcen	Encadrante
M ^{me} . Benzenine Faila	MAA	Univ. Tlemcen	Co- Encadrante
M ^{me} . Elhouari Nesrine	MCB	Univ. Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Avant tout nous remercions ALLAH, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience pour bien mener ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre encadreur M^{me} BENAACHILIF Souad et notre co-encadreur M^{me} Benzenine Faïla de nous avoir pris en charge, pour leurs disponibilités, orientations et conseils précieux.

Nos vifs remerciements vont aussi à nos enseignants qui ont fait de leurs mieux pour nous donner une formation universitaire solide qui nous a permis de préparer ce modeste mémoire, qui nous sera très utile pour notre avenir professionnel.

Nous remercions le président de jury M^r Ghomari Fouad ainsi que l'examinatrice M^{me} Elhouari Nesrine pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre mémoire en acceptant d'examiner notre travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à mon père qui m'a soutenue tout ce long
du chemin et ma mère qui m'a donnée tout son amour pour
terminer mes études, que Dieu me les garde inchaallah. En espérant
un bon rétablissement à ma chère mère inchaallah.*

A ma chère sœur et mon cher frère.

A mon cher oncle Benchrirat Abdelkader .

A ma collègue Bencherif Ibtissem .

A mon binôme Betaouaf Samiha .

Benchrirat Ilham

Je dédie ce travail à mes chers parents.

A toute ma famille.

A tous mes collègues.

A mon binôme Benchrirat Ilham.

Betaouaf samiha

Résumé

La problématique des risques naturels en général et des liquéfactions en particulier est un sujet d'actualité qui marque une action importante dans le monde et spécifiquement en Algérie. En effet, la gestion des risques de liquéfaction devient de plus en plus une nécessité qui doit inclure tous les acteurs et tous les moyens disponibles possibles.

Dans ce travail, après discussion sur le phénomène, les approches théoriques d'estimation du potentiel de liquéfaction, la cartographie des risques de liquéfaction a été présentée. Cette cartographie semble comme l'un des moyens le plus efficace dans le cadre d'une bonne gestion.

Les résultats obtenus de l'étude effectuée sur le site de Mostaganem, montrent que le sol présente un risque de liquéfaction dans les couches sableuses sur toute la surface.

Les cartes obtenues peuvent servir comme document de base aux pouvoirs publics pour définir les règles générales pour une meilleure gestion de l'espace urbain. En effet, elles constituent un moyen d'information de la population sur les risques de liquéfaction et un outil primordial aux décideurs qui ne sont pas forcément du domaine auxquels le choix final de la stratégie de lutte contre le risque de liquéfaction leurs appartient.

Mots clés: Cartographie, Système D'information Géographique, Liquéfaction, Mostaganem.

ملخص

إن مشكل الأخطار الطبيعية عموما و تسييل بشكل خاص يعتبر من بين مواضيع الواقع الأكثر انتشارا والتي سجلت أثرا بليغا في ذاكرة شعوب العالم عموما والجزائر بصفة خاصة، من أجل ذلك أصبح تسيير هذه الأخطار ضرورة حتمية تتضمن إجماع كل الأطراف المعنية واستعمال جميع الوسائل المتوفرة.

فمن خلال هذا العمل عرضت فكرة مناقشة هذه الظاهرة عن طريق نهج النظرية المناسبة لتقدير ظاهرة التسييل عن طريق رسم خرائط لمخاطر التسييل، ويبدو أن رسم الخرائط يعتبر أحد الوسائل الأكثر فعالية للإدارة الجيدة. أظهرت النتائج المتحصل عليها من دراستنا لموقع في مدينة مستغانم أن هناك خطر حدوث تسييل للتربة في الطبقات الرملية على السطح بأكمله.

يمكن لهذه الخرائط أن تكون بمثابة وثيقة أساسية للسلطات العامة لتحديد قواعد العامة بهدف تحسين إدارة البيئة الحضرية، مع توفير وسيلة لإعلام السكان بمخاطر التسييل، بالإضافة الى هذا تعتبر الخرائط أداة لصناعي القرار الذين ليسوا بالضرورة تقنيين، وهذا من أجل اختيارهم النهائي لإستراتيجية المناسبة لمكافحة مخاطر التسييل.

الكلمات المفتاحية: الخرائط، نظم المعلومات الجغرافية، تسييل، مستغانم.

Abstract

The issue of natural hazards in general and liquefaction in particular is a topical issue that marks an important action in the world and specifically in Algeria.

Indeed, the management of liquefaction risks is becoming more and more a necessity that must include all actors and all possible available means .

In this work, after discussion on the phenomenon, the theoretical approaches for estimating liquefaction potential, the mapping of liquefaction risks was presented. This mapping seems to be one of the very effective means of effective management.

Through the results obtained in our study of the Mostaganem site, it can be said in general that there is a risk of liquefaction of the soil in the sandy layers on the whole surface.

It can serve as a basic document for public authorities to define general rules for better management of urban space, while providing a means of informing the population about the risks of liquefaction and an organizational tool for decision-makers are not necessarily technicians, and whose final choice of strategy against liquefaction risk belongs to them.

Keywords: Cartography, Geographic Information System, Liquefaction, Mostaganem.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Liquéfaction des sols	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Définition du phénomène	3
1.3 Histoire de la liquéfaction	3
1.4 Caractéristique du phénomène de la liquéfaction.....	4
1.4.1 Comment se fait la liquéfaction ?.....	4
1.4.2 La liquéfaction à l'échelle microscopique	5
1.4.3 Conséquences de la liquéfaction.....	5
1.4.4 Facteurs influençant la liquéfaction	9
1.4.5 Traitement anti liquéfaction.....	9
1.4.5.1 Colonnes ballastées.....	9
1.4.5.2 Vibroflottation	10
1.4.5.3 Drainage vertical.....	11
1.4.5.4 Injection solide	12
1.4.6 Traitements des sols.....	12
1.4.6.1 Substituabilité du sol à la liquéfaction	13
1.4.6.2 Origine et l'âge géologique du site.....	13
1.4.6.3 La teneur en particule fine, FC(%)	14
1.4.6.4 Indice de plasticité de la partie fine du sol.....	15
1.4.6.5 Le degré de saturation du sol	15
1.4.6.6 La profondeur de la couche du sol	15
1.4.6.7 La résistance du sol à la pénétration :.....	15
1.5 Conclusion	16
Chapitre 2 : Système d'information géographique	
2.1 Introduction.....	17
2.2 Généralités	17
2.2.1 Les éléments d'une carte	17
2.2.2 La production d'une carte (la carte analogue ou traditionnelle)	17
2.2.3 L'utilisation d'une carte.....	19
2.3 La cartographie numérique (S.I.G)	21
2.3.1 Historique.....	21
2.3.2 Définition.....	21

2.3.3	Modélisation.....	23
2.3.4	La structure d'un S.I.G	23
2.3.5	Exemple d'une carte (population d'Algérie en 2013).....	24
2.4	L'information géographique.....	24
2.5	Les type d'un SIG	25
2.6	Les disciplines impliquées pour mettre au point une application SIG	25
2.7	Les fonctionnalités d'un SIG	26
2.8	Domaine d'application	26
2.9	Quelques logiciels SIG	27
2.10	Modes d'acquisition de données	27
2.11	Les données dans un SIG	29
2.11.1	Les données spatiales.....	29
2.11.2	Les données associées.....	31
2.12	La mise à jour des SIG.....	31
2.13	Conclusion	31
Chapitre 3 : Détermination du potentiel de liquéfaction		
3.1	Introduction.....	32
3.2	Description des pénétromètres statiques et dynamiques CPT et SPT	32
3.2.1	Le pénétromètre statique (CPT).....	32
3.2.2	Le pénétromètre dynamique au carottier (standard pénétration test SPT).....	33
3.3	L'évaluation de la liquéfaction	36
3.3.1	La détermination du rapport de la résistance cyclique CRR	36
3.3.2	La détermination du rapport de contrainte cyclique CSR.....	37
3.3.3	Évaluation du facteur de sécurité (FS).....	40
3.3.4	Estimation de la probabilité de liquéfaction (P_L)	41
3.4	Conclusion	42
Chapitre 4 : Cartographie du risque de liquéfaction (site de Mostaganem)		
4.1	Introduction.....	43
4.2	Présentation de site	43
4.2.1	La sismicité	44
4.2.2	Contexte géologique	44
4.3	Programme des reconnaissances géotechniques	44
4.4	Résultats des reconnaissances géotechniques	45
4.5	Exploitation des résultats des sondages carottés	45
4.6	Résultats du test de pénétration standard SPT.....	46

4.7	Evaluation du potentiel de liquéfaction à partir des résultats de l'essai SPT et CPT	48
4.7.1	L'essai SPT.....	48
4.7.2	L'essai CPT	51
4.8	La probabilité de liquéfaction.....	57
4.9	Dispositions constructives.....	58
4.10	Conclusion	61
	Conclusion générale	62

Liste des figures

Chapitre 1 : Liquéfaction du sol

Figure 1. 1 les dégâts causés par la liquéfaction durant le séisme de Nigata 1964 (Juang, C. H, 2002)	4
Figure 1. 2 représentation de liquéfaction a) et b) état initial et c) pendant la liquéfaction (d'après Johansson 2000), cité par Mohamed. M.....	5
Figure 1. 3 Effondrement du parement amont du barrage de San Fernando pendant Le séisme de 1971 ...	6
Figure 1. 4 Ebullition de sable (Juang, C. H, 2002)	7
Figure 1. 5 Effondrement des tabliers (Juang, C. H, 2002)	8
Figure 1. 6 Déplacement latéral et longitudinal (Ali B, 2005)	8
Figure 1. 7 Déplacement latéraux du terrain(Ali B, 2005)	8
Figure 1. 8 Technique de colonne ballasté.....	10
Figure 1. 9 Technique de vibroflottation	11
Figure 1. 10 Technique de drainage	12
Figure 1. 11 Technique de traitement chimique.....	13

Chapitre 2 : Système d'information géographique

Figure 2. 1 Projection dans l'espace système.....	22
Figure 2. 2 Organigramme d'un SIG (Abdelbaki C, 2012)	23
Figure 2. 3 La carte de la population d'Algérie en 2013	24
Figure 2. 4 Les composantes principales d'un SIG	25
Figure 2. 5 Superposition dans un SIG(Abdelbaki C, 2012)	26
Figure 2. 6 Outils de SIG	27
Figure 2. 7 Modes d'acquisition de données(Abdelbaki C, 2012)	28
Figure 2. 8 Les données dans un SIG.....	29
Figure 2. 9 Représentation en mode raster.....	30
Figure 2. 10 Les deux principales composantes (graphique et attributaire) de l'information géographique au format vecteur	30

Chapitre 3 : Détermination du potentiel de liquéfaction

Figure 3. 1Pénétrromètre statique	32
Figure 3. 2 Schéma d'un pénétrromètre dynamique	34
Figure 3. 3 Pénétrromètre dynamique	34
Figure 3. 4 Courbe du facteur de réduction (rd)	39

Chapitre 4 : Cartographie du risque de liquéfaction (site de Mostaganem)

Figure 4. 1 Situation du projet (GOOGLE EARTH, 2021)	43
Figure 4. 2 L'implantation des sondages dans le site d'étude	45
Figure 4. 3 Variation du coefficient de sécurité pour Z=3m	53
Figure 4. 4 Variation du coefficient de sécurité pour Z = 6 m.....	54
Figure 4. 5 Variation du coefficient de sécurité pour Z = 9 m.....	55
Figure 4. 6 Variation du coefficient de sécurité pour Z = 18 m.....	56
Figure 4. 7 La variation du potentiel de liquéfaction	58

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Liquéfaction des sols

Tableau 1. 1 Susceptibilité des dépôts sédimentaires à la liquéfaction (TG : très grande, M : moyenne, F : faible, TF : très faible)	14
--	----

Chapitre 2 : Système d'information géographique

Tableau 2. 1 Les périodes principales dans l'évolution des SIG(Faila B, 2005).....	21
--	----

Chapitre 3 : Détermination du potentiel de liquéfaction

Tableau 3. 1 La classification du porobabilité de liquéfaction	42
--	----

Chapitre 4 : Cartographie du risque de liquéfaction (site de Mostaganem)

Tableau 4. 1La nature lithologique des couches constituant le terrain (D'après le L.C.T.P, Mostaganem, 2014).....	46
Tableau 4. 2 Les valeurs brutes des essais SPT (N1, N2, N3) (D'après le L.C.T.P, Mostaganem, 2014)....	47
Tableau 4. 3 Les facteurs de correction	49
Tableau 4. 4 Résultats des calculs pour le sondage N°01	49
Tableau 4. 5 Résultats des calculs pour le sondage N°02	50
Tableau 4. 6 Résultats des calculs pour le sondage N°04	50
Tableau 4. 7 Résultats des calculs pour le sondage N°06	50
Tableau 4. 8 Résultats des calculs pour le sondage N°08	50
Tableau 4. 9 Résultats des calculs pour le sondage N°10	51
Tableau 4. 10 Résultats des calculs pour le sondage N°11.....	51
Tableau 4. 11 Résultats des calculs pour le sondage N°12.....	51
Tableau 4. 12 Résultats des calculs pour le sondage N°03.....	52
Tableau 4. 13 Résultats des calculs pour le sondage N°07.....	52
Tableau 4. 14 Résultats des calculs pour le sondage N°09.....	53
Tableau 4. 15 La classification du probabilité de liquéfaction pour chaque sondage.....	57
Tableau 4. 16Méthode de mitigation des sites liquéfiables.....	60

Notation

amax: Accélération maximale du sol en surface en (m/s²).

C.P.T: Essai de test de pénétration de cône.

CRR: Rapport de contrainte cyclique générée par le séisme.

CRR7.5: Taux de résistance cyclique pour une magnitude de 7.5

CSR: Rapport de résistance cyclique

Dr: La densité relative.

F: La force horizontale exerce sur la colonne du sol en (KN/m²).

FS: Le facteur de sécurité.

fs: Le frottement latéral unitaire local.

γ: Poids volumique total du colonne de sol en (KN/m³).

K_σ: Facteur de correction du au poids des terres appliqué au CRR7.5.

m: La masse de la colonne en (Kg).

MSF: Facteur de correction de la magnitude.

PL: La probabilité de la liquéfaction.

PL_{moy}: La probabilité de liquéfaction moyenne.

Q_c: L'effort de pointe.

q_c: Résistance à la pénétration du cône ou résistance de pointe.

q_{c1N}: Résistance à la pointe corrigée.

Q_t: Effort total d'enfoncement.

rd: Facteur de réduction de contrainte lié à la flexibilité de la colonne de sol.

S.P.T: Essai de pénétration au carottier.

Z: La longueur de la colonne en (m).

σ_{v0}: La contrainte verticale totale (KPa).

σ'_{v0}: La contrainte verticale effective (KPa).

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

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

Introduction Générale

Introduction générale

La cartographie du risque est un outil primordial pour la visualisation et la gestion du risque d'un phénomène naturel. Son objectif est d'obtenir un document qui facilite la prise de décision. Effectivement, ce document doit contenir la possibilité de survenance et la nature du phénomène, son emplacement (référence spatiale) et de intensité. Avec la prise de conscience des dirigeants et décideurs des effets des risques naturels, la délimitation des zones exposées est une préoccupation de plus en plus importante. Dans notre pays, la cartographie commence à prendre de l'ampleur. Une cartographie du risque est une représentation graphique sur cette représentation les risques individuelles sont identifiés selon leur remplacement. D'autres caractéristiques visuelles telle que la couleur et la taille, peuvent représenter d'autres aspects d'un risque donné, ces caractéristiques peuvent notamment indiquer le type de risque, c'est dans cette idée que nous avons eu recours à la cartographie pour évaluer le risque de la liquéfaction du sol.

La croissance démographique est le grand besoin d'expansion des entreprises, pousse la science des ingénieurs à se développer et en construisant sur des sols dits médiocres. En d'autres termes des sols qui ne sont pas aptes à recevoir des structures mais avec toutes les techniques d'amélioration, cela est devenu possible.

L'ingénieur doit étudier d'autres paramètres extérieurs tels que l'étude sismique. Le séisme est un des phénomènes naturels le plus dévastateur; les structures ne sont pas les seuls à subir des déformations; le sol aussi est affecté par ces vibrations, les sollicitations sismiques créent un phénomène dans les sols saturés appelé la liquéfaction. En effet, c'est un facteur à prendre en grande considération car à défaut d'être négligé cela peut causer des dégâts au niveau de la structure.

Certains sols constitués de grains fins (sables et silts) dont la granulométrie s'inscrit dans un certain fuseau critique sont susceptibles, lorsqu'ils baignent dans la nappe phréatique et se trouvent dans un état initial insuffisamment serré peuvent donner lieu à des phénomènes de liquéfaction. On désigne ainsi un processus dans lequel les facteurs interviennent tels que les cycles de déformations de cisaillement alternées de grande amplitude et la pression de l'eau incluse dans les interstices des grains s'élèvent de cycle en cycle jusqu'à égaler la

pression d'étreinte du milieu, perdant alors tout ou partie de sa résistance au cisaillement . il va se comporter comme un fluide et devient inapte à supporter les charges verticales apportées par les ouvrages.

La liquéfaction est un phénomène dans lequel la résistance au cisaillement d'un sol est réduite par les secousses d'un séisme ou de tout autre chargement rapide. La liquéfaction se produit dans les sols pulvérulents saturés, c'est à dire, les sols dans lesquels l'espace entre les différentes particules est complètement rempli d'eau.

Cette eau exerce une pression interstitielle sur les particules du sol en engendrant une diminution des contraintes effectives régnant dans le sol et donc une diminution de sa résistance au cisaillement qui, à l'état ultime, peut devenir nulle. Avant un séisme, la pression de l'eau est relativement basse. Cependant, les secousses d'un séisme peuvent causer une augmentation considérable de la pression interstitielle de l'eau jusqu'au point où les particules de sol peuvent aisément se déplacer l'une par rapport à l'autre.

Le présent travail comporte les résultats finaux de l'étude de sol du terrain devant recevoir une centrale électrique de 1200 MW à Mostaganem. L'objectif est de réaliser une cartographie du risque du phénomène de la liquéfaction sur le site en considération.

Le présent mémoire est structuré en quatre (04) chapitres :

- **Le premier chapitre** : contient une recherche bibliographique issue de la littérature concernant le phénomène de la liquéfaction a été présenté.
- **Le deuxième chapitre** : présente les notions générales sur la système d'information géographique.
- **Le troisième chapitre** : concerne l'évaluation du potentiel la liquéfaction pour le site de Mostaganem à partir des résultats des essais In situ.
- **Le quatrième chapitre** : contiendra les zones de liquéfaction en les cartographiant et en les analysant selon les critères de sécurité et des essais SPT et CPT.

Chapitre 1
Liquéfaction des sols

1.1 Introduction

La liquéfaction du sol est un phénomène qui se produit sous sollicitations sismiques, ce premier chapitre traite les notions de base de ce phénomène.

1.2 Définition du phénomène

La liquéfaction des sols est un phénomène d'instabilité qui peut avoir lieu sur un milieu généralement granulaire saturé ou partiellement saturé. Ce phénomène est responsable de dommage excessif au niveau des fondations des ouvrages. Elle se manifeste par une augmentation de la pression interstitielle liée au comportement contractant du sol lors de l'application du chargement rapide (choc, séisme ...).

Les études menées montrent que la granulométrie du matériau a une certaine importance ; les sols susceptibles de liquéfier sous chargement cyclique étant limoneux à sableux et à granulométrie serrée, c'est généralement des sables propres ou limoneux situés dans les vingt premiers mètres de profondeur, saturés d'eau et présentant une granulométrie relativement uniforme (Djemal A, 2017).

1.3 Histoire de la liquéfaction

La liquéfaction n'est pas un sujet nouveau dans les recherches géotechniques, On peut citer des centaines d'études sur ce phénomène donc les plus importantes sont les recherches de « Castro, 1969, Canou, 1989, Ishihara K. , 1993 » .(Quang huy Dang, 2019).

Historiquement, ce phénomène se produit dans des sols sableux lâches et saturés, les catastrophes qu'il peut causer en été mis en évidence pour la première fois en 1964 lors de séisme à Nigata au Japon et en Alaska, aux Etats-Unis. En raison de ces événements, la liquéfaction a été largement étudiée sur le terrain et au laboratoire permettant d'évaluer le potentiel de liquéfaction et la résistance des sites déterminés à l'aide d'informations basées sur les propriétés du sol et le risque sismique. Cela a conduit à un consensus général sur le comportement non drainé du sable propre, les effets des fines sur ce type de comportement restent toujours un sujet de désaccord. (Quang huy Dang, 2019)

Les figures qui suivent illustrent les dégâts causés par la liquéfaction durant le séisme de Nigata 1964.



Figure 1.1 Les dégâts causés par la liquéfaction durant le séisme de Niigata 1964(Juang, C. H, 2002)

1.4 Caractéristique du phénomène de la liquéfaction

Ce phénomène se produit en présence d'eau souterraine, remontant à la surface et faisant ainsi perdre la cohésion des particules des sols en surface, ce sol va se comporter comme une roche meuble.

Lors des secousses sismiques, sous l'action des ondes de compression émises la pression d'eau présente dans les interstices du sol granulaire augmente et lui fait perdre sa cohésion. Des jets d'eau et de sable remontent à la surface sous l'effet de cette pression d'air avant de retomber sous forme de cône de sable. Des affaissements localisés par tassement de la couche des sables dont les grains se réorganisent se produisent. Lorsque la couche de sol liquéfiée se trouve sous un talus cela produit un glissement de terrain.

Les installations portuaires sont souvent situées dans des zones susceptibles de se liquéfier. De plus, lorsque le sol se liquéfie, la pression qu'il exerce sur les murs qui soutiennent les quais peut augmenter suffisamment pour que celui-ci soit endommagé comme à KOBE en 1995.

1.4.1 Comment se fait la liquéfaction ?

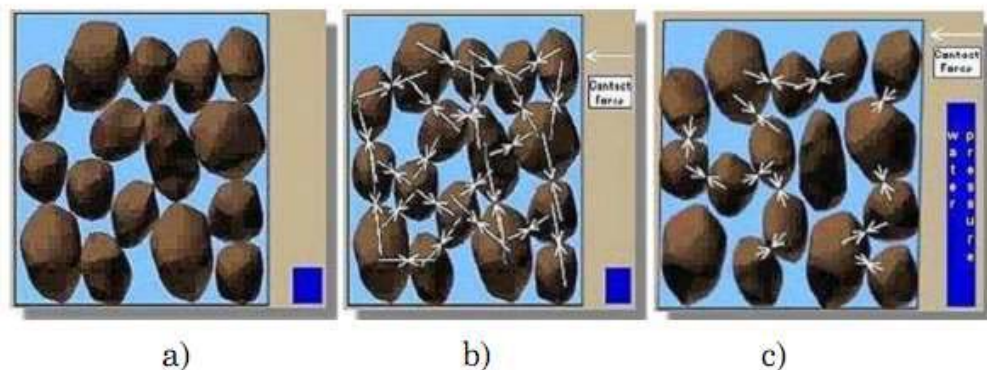
Plus la pression de l'eau augmente, plus l'eau ne supporte la charge. C'est là où le sol perd sa cohésion et commence à couler comme un liquide.

Le passage d'une onde sismique pousse dans certaines formations géologiques à la perte de résistance dans un matériau sableux saturé en eau dans un état lâche liée à une augmentation de la pression interstitielle engendré par les déformations cycliques.

La déconsolidation brutal du matériau se traduit par la déstructuration du sol, rendant particulièrement instable les constructions reposant sur des informations. (Mohamed M, 2009)

1.4.2 La liquéfaction à l'échelle microscopique

Le phénomène peut être représenté dans la figure 1, à l'état initial les grains sont au repos, ils sont dans un environnement saturé et dans un état relativement lâche. Ils sont en contact les uns avec les autres permettant la transmission des efforts s'exprimant a plus grand échelle par la notion de contraintes effectives. Lors d'un chargement dynamique, une réorganisation des grains se produit. En condition non drainée, cette réorganisation se traduit par une montée en pression de l'eau interstitielle puisque les grains n'occupent plus un volume suffisant pour entretenir la transmission des contraintes effectives initial. Celles ci s'annule donc , ce qui a pour conséquence la montée en pression de l'eau interstitielle jusqu'à égaler les contraintes totales , les contacts entre les grains sont alors très faible et l'ensemble se comporte comme un liquide , il y'a liquéfaction du matériau . (Mohamed M, 2009). La figure ci-dessous représente la liquéfaction à l'échelle microscopique.



Indic :



-  : Représente La force de contact entre les particules
-  : Représente le niveau de la pression interstitielle

Figure 1. 2 Représentation de liquéfaction a) et b) état initial et c) pendant la liquéfaction (d'après Johansson 2000), cité par Mohamed. M.

1.4.3 Conséquence de la liquéfaction

Lorsque la liquéfaction se produit, la résistance du sol diminue et la capacité portante d'un dépôt de sol constituant la fondation des bâtiments et des ponts se réduit

significativement en provoquant le basculement et la flottaison de l'ouvrage. Le sol liquéfié exerce également une pression plus élevée sur les murs de soutènement qui peuvent à leur tour causer le glissement de ces derniers. (Mohamed M, 2009)

Ce phénomène est un problème qui cause en général des dégâts irréparables, il provoque des dommages tels que l'effondrement du meuble, la rupture du barrage, l'effondrement du pont et des grands bâtiments dans les fondations, ainsi elle peut provoquer un développement des forces de poussées, un soulèvement des ouvrages enterrés et rupture de canalisation.

L'augmentation de la pression de l'eau peut également déclencher des éboulements et causer l'effondrement des barrages. Le barrage de San Fernando a souffert d'un effondrement du parement amont pendant le séisme de San Fernando, 1971. Heureusement l'effondrement à peine évité de barrage empêchant de ce fait un désastre potentiel d'inondation des secteurs urbains fortement peuplés. (Mohamed M, 2009). La figure ci-dessous représente l'effondrement du parement amont du barrage de San Fernando pendant le séisme de 1971.



Figure 1. 3 Effondrement du parement amont du barrage de San Fernando pendant Le séisme de 1971

Durant le séisme de Niigata (1964) et de Boumerdes (2003), des ébullitions de sable et des fissures de sol ont été observées sur différents sites à Niigata et à Boumerdes. Durant le séisme de LomaPrieta (1989) aux Etats-Unis, de nombreuses ébullitions de sable ont été

observées en un certain nombre de sites à savoir l'aéroport d'Oakland, le long du fleuve de salinas, et la station marine de MossLanding. (Mohamed M, 2009). La figure ci-dessous représente l'ébullition du sable.



Figure 1. 4 Ebullition de sable (Juang, C. H, 2002)

Aussi, il était observé que la liquéfaction a causé le mouvement latéral des fondations du pont du Show à Nigata en provoquant les effondrements des tabliers et de déplacement latéral et longitudinal des fondations des ponts d'Isser à Boumerdes.

Les glissements latéraux de sols légèrement inclinés entraînant des déplacements horizontaux pouvant atteindre plusieurs mètres. C'est un phénomène courant, des preuves de liquéfaction ont été observées dans les abords de l'oued Isser (Boumerdes, 2003) et aussi lors du séisme du Japon 2001 (Bhuj).

Ce phénomène se traduit par un déplacement horizontal des terrains avec apparitions de larges fractures parallèles au cours d'eau. Ces fractures affectent une zone larges de plusieurs dizaines de mètres et de déplacement total devrait atteindre plus de 3mètre. (Mohamed M, 2009). Les figures ci-dessous représentent l'effondrement du tablier et le déplacement latéral et longitudinal et le déplacement latéraux du terrain.



Figure 1. 5 Effondrement des tabliers (Juang, C. H, 2002)



Figure 1. 6 Déplacement latéral et longitudinal (Ali B, 2005)



Figure 1. 7 Déplacement latéraux du terrain (Ali B, 2005)

1.4.4 Facteur influençant la liquéfaction

Plusieurs paramètres peuvent avoir une influence considérable sur le comportement des sols :

- La distribution granulométrique
- La densité relative
- La saturation
- La structure du sol
- La présence de fines
- La profondeur de la nappe phréatique
- La pression de confinement
- Influence de l'histoire de contraintes et déformations

1.4.5 Traitement anti liquéfaction

Lorsque que les sols posent des problèmes des tassements, de portance ou de liquéfaction pour un ouvrage, les améliorations et les renforcements de sol sont en général la première option étudiée. On distingue trois types d'amélioration de sol : les inclusions rigides, les inclusions souples, et les améliorations de sol dans la masse .

Les améliorations de sol dans la masse (vibrocompactage, compactage dynamique) et les inclusions souples constitués de gravier (colonne ballastées, plots ballastées), permettent de renforcer les caractéristique mécaniques du massif de sol traité.

Les inclusions rigides ou les colonnes à module mixte constituées essentiellement de mortier ou de béton sont une autre grande famille qui n'améliore pas en général les caractéristiques des sols en place mais permettent son renforcement en réduisant les sollicitations exercées sur ce dernier.

1.4.5.1 Colonnes ballastées

Le procédé des colonnes ballastées sèches, développé à la fin des années 50 par Killer, est une technique d'amélioration de sol permettant de créer des colonnes de granulats expansées, afin d'augmenter la portance d'un sol et d'en réduire sa compressibilité.

Le mode opération est le suivant :

- Mise en station de la foreuse au droit du point de fonçage ; un chargeur à godet assure l'approvisionnement du granulat

- Fonçage de l'outil préalablement rempli de matériaux mise sous pression d'air jusqu'à la cote de traitement ; le vibreur est descendu par deux actions : la vibration et une poussée en pointe de l'ordre de 25 tonnes.
- Lorsque la profondeur est atteinte, mise en œuvre de matériaux en pointe de l'outil (technique dite « bottom feed ») par expansion longitudinale et latérale.
- La colonne est exécutée ainsi par passe successives jusqu'à la plateforme d'intervention.

La figure ci-dessous représente la technique de colonne ballastée.

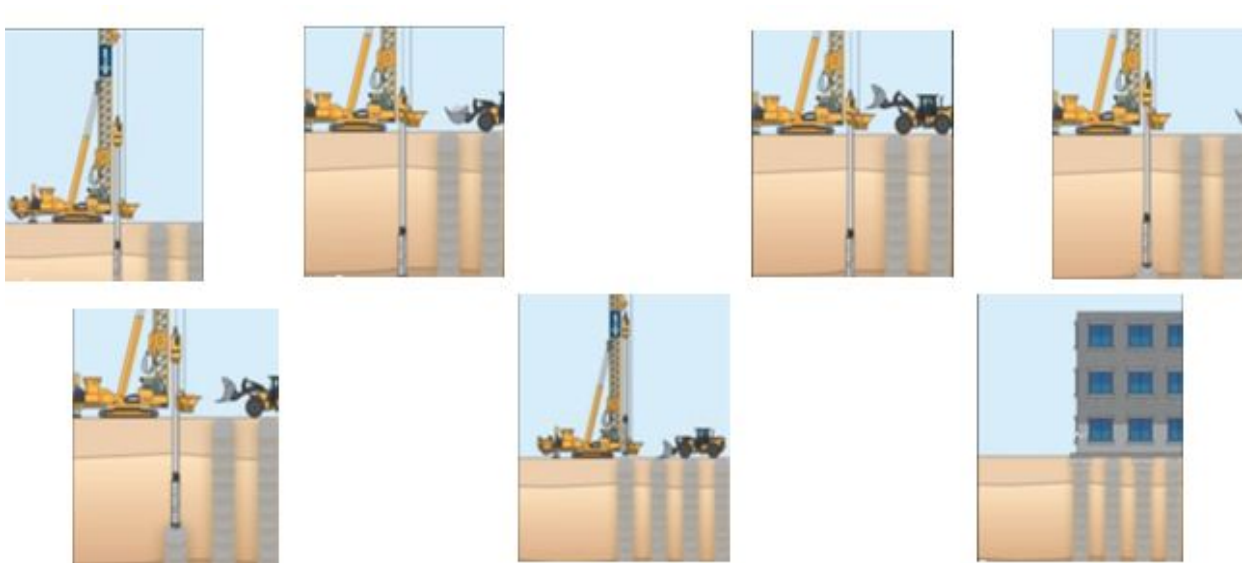


Figure 1. 8 Technique de colonne ballastée.

1.4.5.2 Vibroflottation

Cette technique s'applique aux sols granulaires non cohérents tels que sable et graviers, les vibrations provoquées par l'outil engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet surpressions interstitielles. La figure ci-dessous représente la technique de vibroflottation.

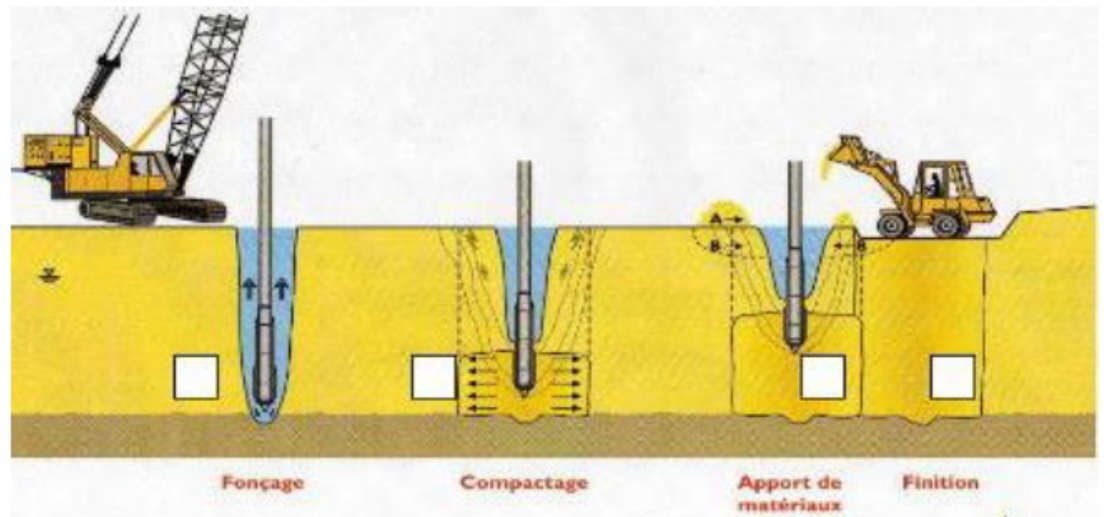


Figure 1. 9 Technique de vibroflotation

1.4.5.3 Drainage vertical

Le drainage vertical est une technique complémentaire des techniques de pré chargements, il permet une consolidation plus rapide du sol.

Le drainage vertical s'applique au terrain peut perméables et permet d'augmenter considérablement leur vitesse de consolidation.

Les drains verticaux sont utilisés pour l'amélioration de sols saturés en eau des terrains argileux. La technique consiste à fonder verticalement dans le terrain, suivant un maillage déterminé, un drain préfabriqué, au moment de sa mise pour en service, le drain véhicule l'eau dans le terrain jusqu'à la surface. La surcharge est apportée soit un remblai de pré chargement, soit par d'autre méthodes. La figure ci-dessous représente la technique de drainage.

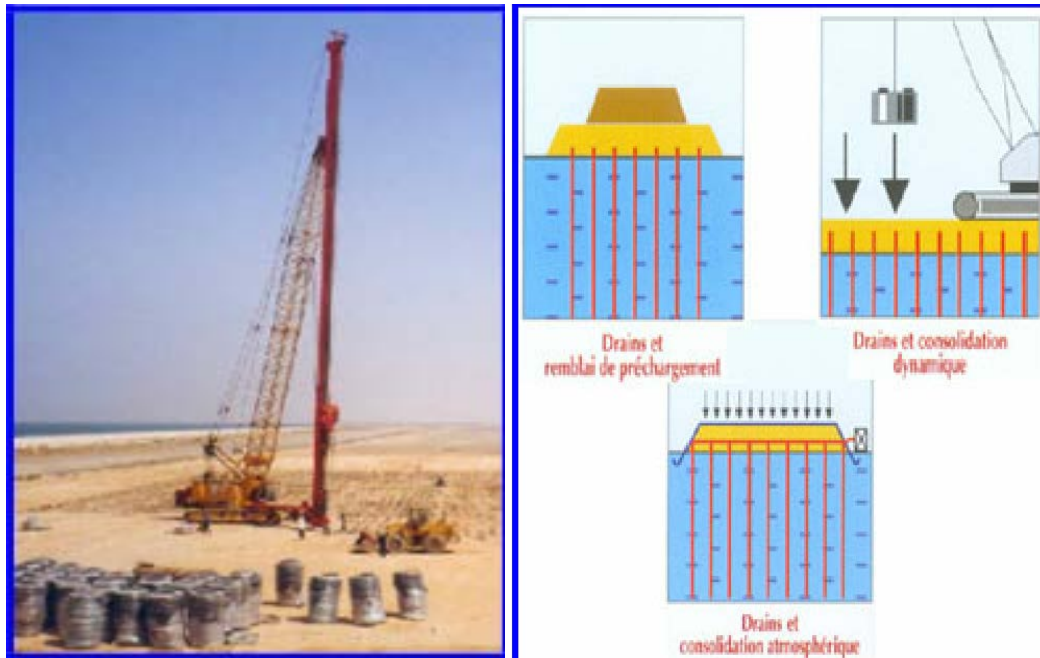


Figure 1.10 Technique de drainage

1.4.5.4 Injection solide

Cette technique consiste à densifier une couche de sol localisée en profondeur par injection sous forte pression (50 à 80 bars) d'un mortier relativement visqueux.

Cette solution de consolidation de sol est généralement utilisée pour compacter et densifier les terrains lâches, ainsi que pour relever et assoir les structures qui ont tassé. Cette technique peut aussi être retenue pour traiter des couches de sols liquéfiables sous sollicitations sismiques.

1.4.6 Traitements des sols

Il existe 3 types de traitements chimiques courant :

- Traitement à la chaux ;
- Traitement au ciment ;
- Les colonnes de sol traité

Les colonnes de sol traité permettent de mettre en œuvre et de compacter les sols mouillés qui normalement ne pourraient pas être compactés correctement.

L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse et à pour effet de réduire le taux d'humidité. La figure ci-dessous représente la technique de traitement chimique.



Figure 1. 11 Technique de traitement chimique

1.4.6.1 Substituabilité du sol à la liquéfaction

Les sols susceptibles à la liquéfaction sismique sont en général de nature pulvérulent (Sable, gravier, sable limoneux, sable argileux...) de faibles résistances et complètement saturés.

Outre cette définition générale, on dispose de critères empiriques d'identification des sols liquéfiables notamment :

- L'origine et l'âge géologique du site
- La teneur en particules fines
- L'indice de plasticité de la partie fine du sol
- La saturation par l'eau interstitielle
- La profondeur du matériau
- La résistance à la pénétration

1.4.6.2 Origine et l'âge géologique du site

Le risque de liquéfaction diminue lorsque l'âge du dépôt du sol pulvérulent augmente. Les dépôts issus du pré-pléistocène ou du pléistocène ne sont en générale pas liquéfiables.

Ce sont les dépôts récent, âgé de moins de 5 siècles, qui sont les plus prédisposées a la liquéfaction, tout matériaux étant confondus. (Abdeljalil Z., 2019).

Ce tableau représente la susceptibilité des dépôts sédimentaires à la liquéfaction.

Tableau 1. 1 Susceptibilité des dépôts sédimentaires à la liquéfaction (TG : très grande, M : moyenne, F : faible, TF : très faible)

Type de Dépôt	Probabilité de liquéfaction sismique de dépôt sédimentaire pulvérulent saturé			
	Age géologique < 500 ans	holocène	pléistocène	Pré-Pléistocène
Dépôts continentaux				
Canal rivière	TG	G	F	TF
Plaine d'inondation	G	M	F	TF
Delta	G	M	F	TF
Dépôt lacustre	G	M	F	TF
Colluvion	G	M	F	TF
Dunes	G	M	F	TF
Lœss	G	G	G	INCONNUE
Tuff	F	F	TF	TF
Sols résiduels	F	F	TF	TF
Sebkha	G	M	F	TF
Zone côtière				
Delta	TG	G	F	TF
Estuaire	G	M	F	TF
Plage haute énergie de vagues	M	F	TF	TF
Plage faible énergie de vagues	G	M	F	TF
Dépôts artificiels				
Remblai non compacté	TG	---	---	---
Remblai compacté	F	---	---	---

1.4.6.3 La teneur en particule fine, FC(%)

Teneur en particules fines (fine content) FC (%) : la teneur en grains ayant une taille inférieure à 74-80.

Des séismes antérieurs nous montrent que le risque de liquéfaction diminue avec FC (%), avec un seuil de 35% au-delà duquel, la liquéfaction ne se manifeste pas. (Abdeljalil. Z, 2019)

1.4.6.4 Indice de plasticité de la partie fine du sol

Le risque liquéfaction diminue avec l'indice de la plasticité, en générale les sols non liquéfiables ont simultanément :

- Une limite de liquidité plus grande que 35%
- Une teneur en eau plus petite que 0,9 fois à limite de liquidité
- Un diamètre inférieur à 15.

Ces trois critères sont souvent appelés critère chinois de non liquéfaction.

Outre les critères chinois applicables aux sols fins, le règlement parasismique français PS-92 considère un sol constitué des sables, sables vasards, ou des limons, comme prédisposé à la liquéfaction s'il est :

- Saturé
- Ayant un coefficient d'uniformité inférieur à 15
- Ayant un diamètre efficace entre 0.05 et 1.05 mm
- Soumis à une contrainte effective en présence de l'ouvrage inférieur à 200-300kpa selon la zone sismique. (Abdeljalil. Z, 2019)

1.4.6.5 Le degré de saturation du sol

L'expérience montre qu'un degré de saturation minimal de 85-85% présente une condition nécessaire à la liquéfaction. (Abdeljalil. Z, 2019)

1.4.6.6 La profondeur de la couche du sol

Les constats des cas de la rupture de sols de fondations de sols de fondations par liquéfaction a montré que la liquéfaction profonde c'est-à-dire se manifestant à plus de 15 à 20 mètre, n'altère pas la capacité portante du sol à proximité de la surface. (Abdeljalil. Z, 2019)

1.4.6.7 La résistance du sol à la pénétration :

Le risque de liquéfaction se diminue avec la résistance à la pénétration du sol, cette dernière est en pratique quantifiée par l'essai de pénétration statique CPT, donnant la résistance en pointe pénétrométrique, ou l'essai de pénétration standard SPT, donnant le nombre de coup nécessaire à l'enfoncement du carottier 30cm.

Selon Seed et Idriss (1982), le seuil du nombre des coups normalisée au de-là duquel la liquéfaction n'as pas été observée est de 22.

Mercusson et al (1990) ont suggéré un seuil de 30 coups pour, alors que l'expérience chinoise tend plutôt vers une valeur seuil de 40 coups.

Selon Shibata et Tiparaska (1988), la valeur seuil de la résistance pénétrométrique normalisée soit, au de-là laquelle la liquéfaction ne se déclenche pas est de 15 Mpa.

Si au moins trois de ces critères d'identification montrent que la liquéfaction est faiblement probable, ceci dispense de mener une analyse de potentiel de liquéfaction. (Abdeljalil. Z, 2019)

1.5 Conclusion

La liquéfaction du sol est un phénomène très dangereux car le changement de l'état du solide au liquide peut causer beaucoup de dégâts sur les structures, il est donc importants de ne pas négliger ce fait pour tout les sols pouvant présenter des critères de liquéfaction sous sollicitation dynamique.

Par conséquent les ouvrages doivent donc être adapter aux sols car de bonnes fondations sur un sol médiocre n'impliquent pas forcément une bonne qualité.

Chapitre 2

Systeme d'information géographique

2.1 Introduction

L'émergence de l'approche ingénieuse qu'est la systémique a donné un rebondissement considérable à la science dans tous les domaines. Sortie de son "cocon" pour lequel elle a été développée (informatique, militaire), elle est également utilisée dans la biologie, la sociologie et l'aménagement du territoire. Aussi, de par sa complexité et son hétérogénéité, l'information géographique ne peut être utilisée que dans un système géographique global conceptualisé par l'ingénierie système qui apportera des solutions à l'ensemble des problèmes concernant ce système. Avec ces outils l'adéquation du SIG aux besoins réels est garantie.

L'avancée de la technologie a fait évoluer la manière du stockage de l'information, la rapidité des recherches, la manipulation et l'analyse, la mise à jours, la création de des bases de données. Tout cela nous mène vers des différentes architectures de stockage de l'information sur ordinateur et vers des outils de gestion de plus en plus élaborés. Les techniques les plus récentes de gestion des informations mettent en œuvre des systèmes-experts grâce à l'utilisation des outils proposés par l'intelligence artificielle.

Ces structures appliquées au milieu environnant sont appelées Systèmes d'Information Géographique, souvent abrégés en SIG.

Ce chapitre contiendra l'essentiel des systèmes d'information géographiques en vue de localisation et d'étude de phénomènes dans l'espace à de fins de description, d'explication et de modélisation.

2.2 Généralités

Nous allons présenter les constituants d'une carte :

2.2.1 Les éléments d'une carte

- Titre, source, date, producteur
 - Orientation
 - Echelle
 - Légende et toponymie
 - Informations particulières

2.2.2 La production d'une carte (la carte analogue ou traditionnelle)

***la restitution :**

Pour rétablir le relief tridimensionnel à partir des photos aériennes, le cartographe se sert d'un don naturel de l'homme : la faculté de voir 3 dimensions. (Melouka. S, 2020)

(Toute restitution doit être contrôlée et complétée sur le terrain).

***la stéréoscopie :**

En raison du léger écart entre les deux yeux humains, ceux-ci captent des images légèrement décalées l'une de l'autre. Ces deux images se confondent dans l'esprit de l'homme en une seule image tridimensionnelle.

Lors de la restitution photogrammétrique, les photos aériennes sont installées par couples dans un appareil restituteur. (Melouka. S, 2020).

***le complètement :**

La restitution à partir des photos aériennes permet de générer une première image de la carte.

La photo aérienne ne peut toutefois livrer toutes les données nécessaires à la réalisation d'une carte actuelle, complète et informative. Le résultat de la restitution doit donc être contrôlé et complété par des informations à caractère descriptif, nominatif et administratif, dont :

- la nature d'un bâtiment (agricole, commerciale, industrielle).
- ses attributs (école, mairie, réservoir...).
- les noms des rues et les toponymes (lieux-dits, lieux habités).
- les limites administratives et autres. (Melouka. S, 2020)

***l'échelle :**

L'échelle d'une carte exprime le rapport de réduction entre la réalité et la représentation sur la carte.

Exemple : $1/20000$: 1 cm sur la carte = 20000 cm en réalité.
= 200 m en réalité.

***la généralisation :**

Sur une carte à petite échelle, il est impossible de représenter tous les objets dans des propositions réelles sans perdre la lisibilité.

Généraliser une carte veut dire :

- Simplifier (tracé d'un cours d'eau, d'une route...)
- Agrandir et déplacer (en élargissant une route, les bâtiments sont décalés) ;
- Regrouper (les maisons individuelles sont regroupés en blocs bâtis) ;
- Supprimer (dans chaque catégorie les objets moins importants ne sont plus représentés). (Melouka. S, 2020)

- La carte topographique est une représentation aussi fidèle que possible de la réalité. Pour y arriver, le cartographe transforme les informations en une image cartographique lisible et compréhensible. Ses instruments sont des symboles, des signatures, des couleurs et des textes.
- Lignes caractéristiques (relief du terrain) :
 - Le terrain se compose de facettes planes raccordées par des arrondis. Les arêtes formées par l'intersection des surfaces planes, supposées prolongées, sont les lignes caractéristiques du terrain. On distingue :
 - Les lignes de **thalweg** (thal = vallée, weg = chemin) : sont les lignes basses du relief. Elles sont formées par l'intersection de facettes qui se coupent vers le bas. Les thalwegs, lignes de réunion des eaux, marquent le fond des vallées et sont en général suivis par les cours d'eau. Lorsqu'on se déplace le long d'un thalweg, le terrain monte à droite et à gauche.
 - Les lignes de **faite** (ou de crête) sont des lignes hautes du relief. Elles sont formées par l'intersection de facettes qui se coupent vers le haut. Les lignes de faite sont des lignes de partage des eaux. Lorsqu'on suit une ligne de faite le terrain descend à droite et à gauche.

2.2.3 L'utilisation d'une carte

* orienter la carte :

Avant d'utiliser une carte sur le terrain, il faut l'orienter ce que signifie faire correspondre sa position aux réalités du terrain. On fait donc coïncider le Nord de la carte avec le Nord du terrain. **Le NORD de la carte** est donné par les écritures : il est en haut quand les noms sont dans le sens de la lecture.

Pour trouver **Le NORD sur le terrain**, on peut envisager différents cas :

- Si on se trouve sur un alignement bien défini (une route vers un village), on fait tourner la carte jusqu'à ce que le tracé de la route sur la carte coïncide avec l'alignement de la route en réalité.
- Si on se trouve sur un point connu, et si dans une certaine distance on peut définir un point de repère bien défini, on relie les deux points sur la carte et on fait de nouveau coïncider la ligne sur la carte avec la direction sur le terrain. Un deuxième point de repère permet d'ailleurs de vérifier la position.

- Si on est situé sur un point inconnu et qu'on ne trouve pas de point de repère, la montre permet de retrouver le Nord à l'aide de la position du soleil et de l'heure solaire : avec la montre en position horizontale on vise le soleil avec la petite aiguille de la montre. La bissectrice (=direction qui passe par le milieu) de l'angle formé par la petite aiguille et le 12 est dirigée vers le Sud ; la direction opposée montre vers le Nord. (Melouka. S, 2020)

***la carte et la boussole :**

Toute boussole ordinaire permet d'orienter une carte d'une manière précise. la boussole montre le **NORD magnétique**. Qui diffère légèrement du **NORD géographique**.

Cette différence, appelée **déclinaison magnétique**, est indiquée dans la légende de la carte topographique. (Melouka. S, 2020)

Etant très faible, elle peut toutefois être négligée dans le cadre d'orientation d'une carte.

***mesurer sur une carte :**

La carte topographique a le grand avantage de permettre la mesure des éléments représentés et de les transposer dans la nature. Les mesures sont d'autant plus exactes que l'échelle est grande, c'est-à-dire que les éléments représentés sont grand. (Melouka. S, 2020)

***Les distances :**

Une carte représente un plan horizontal.

Une distance mesurée sur la carte est donc aussi une **distance horizontale**.

En nature, il faut tenir compte des **dénivelées du terrain**. Un trajet entre deux points sur le terrain est donc plus long que sa représentation sur la carte. Lors de la préparation sur une carte d'un trajet entre deux repères fixes, on doit donc prendre en considération que le chemin est en réalité plus long et peut être plus fatigant du aux dénivelées du terrain. (Melouka. S, 2020)

***la pente :**

A partir des courbes de niveau et des points cotés sur la carte, on peut définir la pente d'un chemin ou d'une colline.

La pente est la relation entre la distance et la différence de hauteurs entre 2 points, exprimée en pourcentage.

On calcule la pente à partir de 2 points bien définis.

Exemple :

Hauteur du point A : 284m.

Hauteur du point B : 298m.

1. Mesurer la distance entre A et B : 680m.

2. Différence entre A et B : 14m

3. Pente : $\frac{14 \times 100}{680} = 2\%$

2.3 La cartographie numérique (S.I.G)

Pour pouvoir utiliser les cartes traditionnelles, appelées aussi cartes analogues, dans le cadre d'applications informatiques, il faut les transformer en carte digitales.

2.3.1 Historique

D'après MAGUIR et AL, 1991, on distingue 3 périodes principales dans l'évolution des SIG, qui sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 2. 1 Les périodes principales dans l'évolution des SIG (Faïla. B, 2005)

Fin des années 1950	Milieu des années 1970	Début des années 1980
<ul style="list-style-type: none"> - Début de l'informatique. - Premières cartes automatiques 	<p>Diffusion des outils de cartographie automatique/SIG dans les organismes de l'état (armée, cadastre, service topographiques,...).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Croissance du marché de logiciels ; - Développement des applications sur PC ; - Mise en réseau (base de données distribuée depuis les années 1990 des applications sur internet) ; - Banalisation de l'usage de l'information géographique (cartographie sur internet,...),

2.3.2 Définition

Parmi de nombreuses définitions, nous allons citer :

1) Un système d'information géographique est un ensemble d'équipements informatiques, de logiciels et de méthodologies pour la saisie, la validation, le stockage et l'exploitation de données, dont la majorité est spatialement référencée, destinée à la simulation de comportement d'un phénomène naturel, à la gestion et l'aide à la décision.

2) « un SIG, dans une définition étroite, est un système informatique pour la saisie, la manipulation, le stockage et la visualisation des données spatiales numériques. Dans une définition plus large, il est un système numérique d'acquisition, de gestion, d'analyse, de modélisation et de visualisation de données spatiales aux fins de la planification, l'administration et le contrôle de l'environnement naturel et aux applications socio-économiques » (Konecny,2003), (Yacine. K, 2018).

3) Les SIG sont la jointure entre les deux entités : Les systèmes d'information (Collection d'informations) et le géoréférencement. (Espace localisé).

De plus, les systèmes d'information géographique (SIG) représentent l'outil indispensable pour traiter et analyser un volume considérable de données de nature, de source et de forme différentes. Le volume de ces données est devenu si important, qu'il est impératif de recourir aux capacités de stockage, de traitement et de mise à jour offertes par les SIG pour les mettre à la disposition des utilisateurs et des gestionnaires.(Mohammed. T, 2013).La figure ci-dessous représente la projection dans l'espace système qui veut dire la représentation de l'information géographique en réalité dans un SIG.

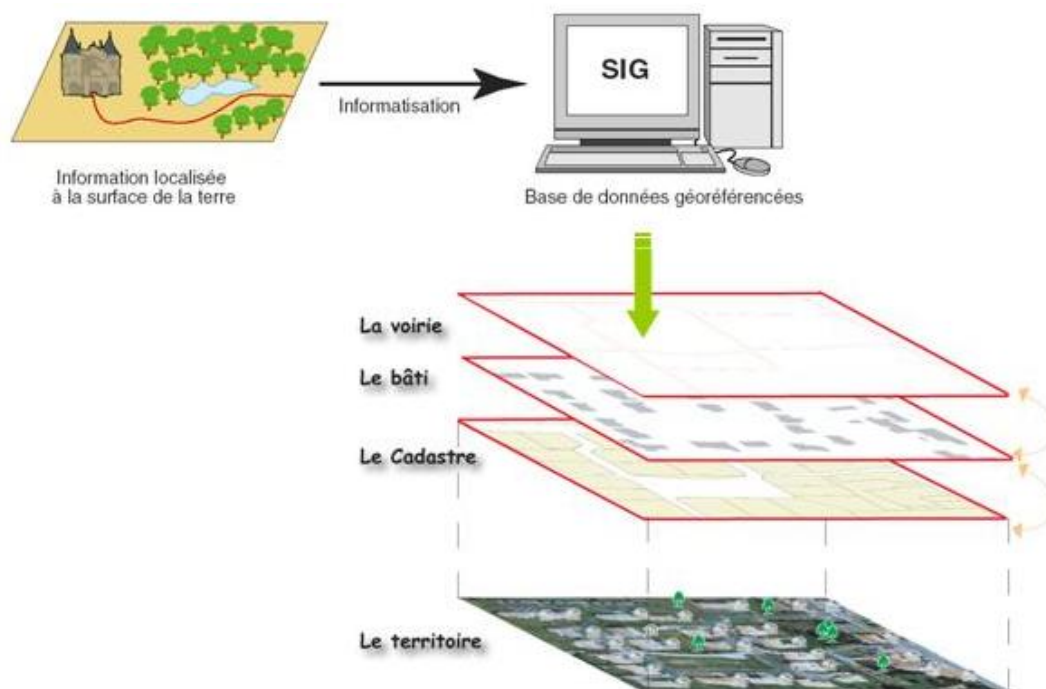


Figure 2. 1 Projection dans l'espace système

2.3.3 Modélisation

Pour la modélisation, le système étudié est appelé système primaire. Son modèle (équivalent) est une représentation de la réalité et est dit système Secondaire. Par définition un modèle est une représentation simplifiée de la réalité. Le but majeur de cette opération c'est **Décrire**, **Prédire**, **Expliquer** et **Réagir**. Utiliser comme un outil de travail. (Mohammed. T, 2013).

2.3.4 La structure d'un S.I.G

La figure 2.2 met en évidence quatre groupe de fonctionnalités au-dessous d'une couche d'application : l'acquisition des données géographiques d'origines diverses, la gestion pour le stockage et la recherche des données, l'analyse spatiale pour le traitement et l'exploitation et enfin la présentation des résultats sous forme cartographique.

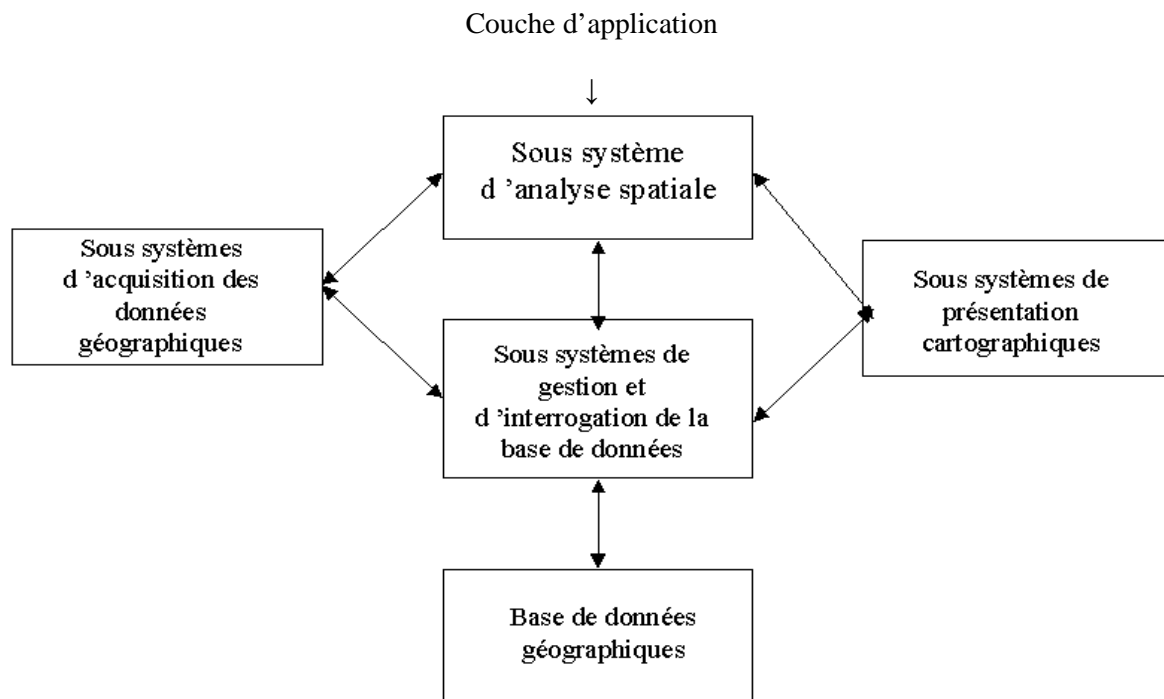


Figure 2. 2 Organigramme d'un SIG (Abdelbaki. C, 2012)

2.3.5 Exemple d'une cartographie (population d'Algérie en 2013).

La carte suivante représente la population en Algérie qui a atteint 39208000 hab en 2013.

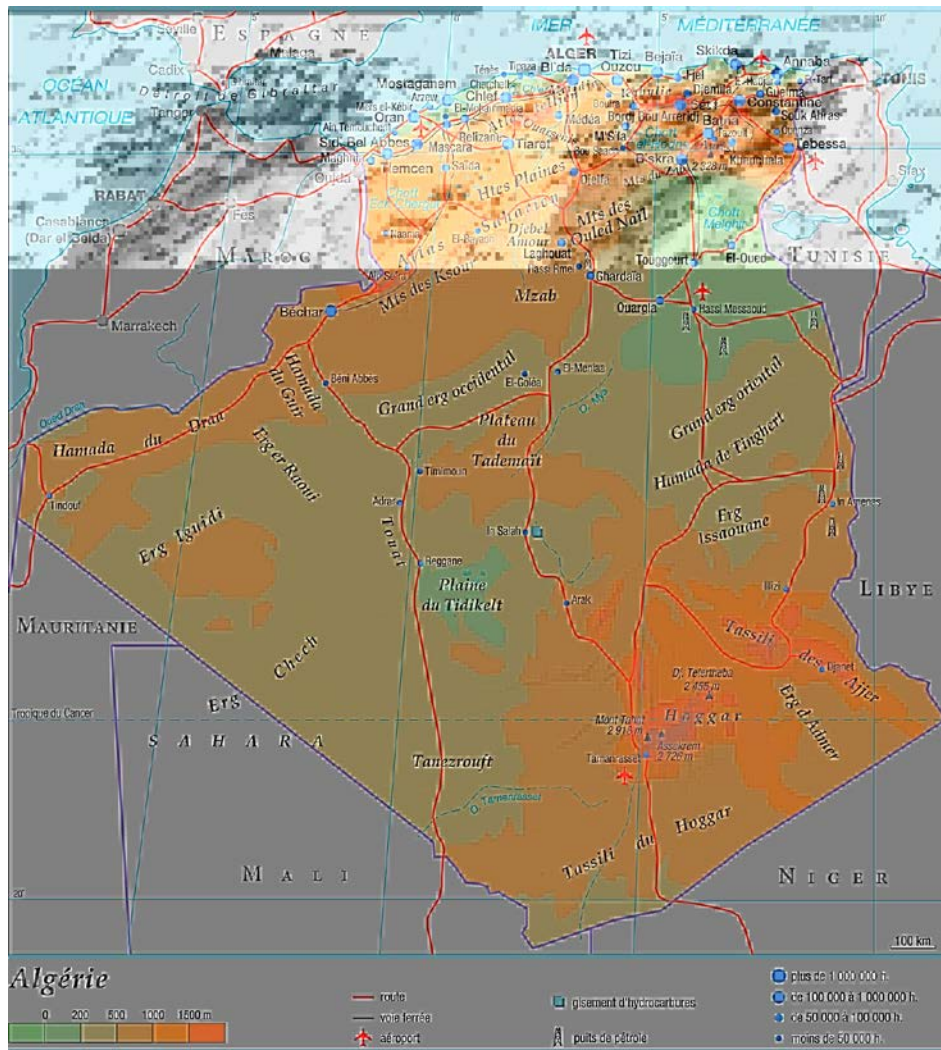


Figure 2. 3 La carte de la population d'Algérie en 2013

2.4 L'information géographique

L'information géographique se présente désormais sous forme de base de données informatique, qui permet des échanges de données plus efficaces, ainsi qu'une exploitation et une mise à jour beaucoup plus rationnelles.

Elle est acquise, analysée, stockée, visualisée et distribuée à l'aide d'un système géographique ayant une référence sous forme de nom de lieu, de coordonnée ou d'adresse postale etc.

2.5 Les type d'un SIG

Il existe trois types de SIG, en fonction du besoin et de l'utilité recherchée :

- **SIG type de gestion** : son rôle est de faciliter la gestion de la base de données.
- **SIG type d'étude** : son rôle est de répondre à une étude particulière.
- **SIG type observatoire** : son rôle est de maintenir à jour l'information sur un site donné.

Le SIG utilisé pour la wilaya de Mostaganem (notre site) est un SIG type étude. (Faïla. B, 2005).

2.6 Les disciplines impliquées pour mettre au point une application SIG

Ce sont les principales composantes d'un SIG comme suit :

- Une base de données géographique (étude et analyse spatiale, thématique).
- Un système de représentation mathématique.
- Un système de représentation cartographique (technique de dessin des cartes).
- Un système de traitement d'image.
- Un système de traitement statistique.
- Un système de donnée administrative.
- Un système de recherche opérationnelle.

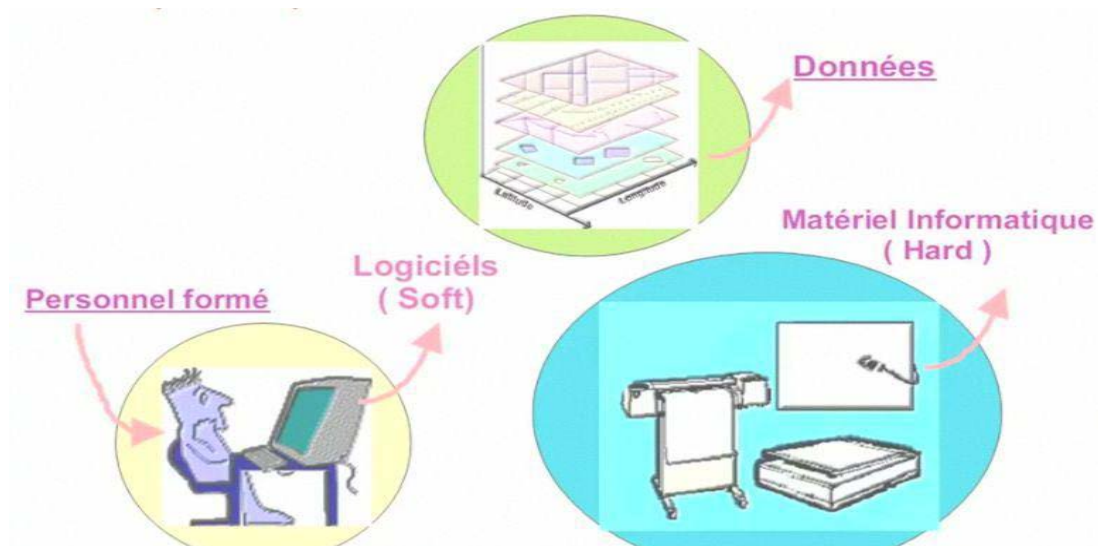


Figure 2. 4 Les composantes principales d'un SIG

2.7 Les fonctionnalités d'un SIG

Dans chaque système elles sont regroupées en 5 (5A) ou 6(6A) familles pour :

- **A**cquisition : Collecte de l'information
- **A**bstracton : Projection mathématique.
- **A**rchivage : Consolidation et stockage
- **A**ffichage : Visualisation personnalisée.
- **A**nalyse : Extraction des sens.
- **A**nticipation : Prospective. (Mohammed. T, 2013).

La figure ci-dessous représente la superposition dans un SIG.

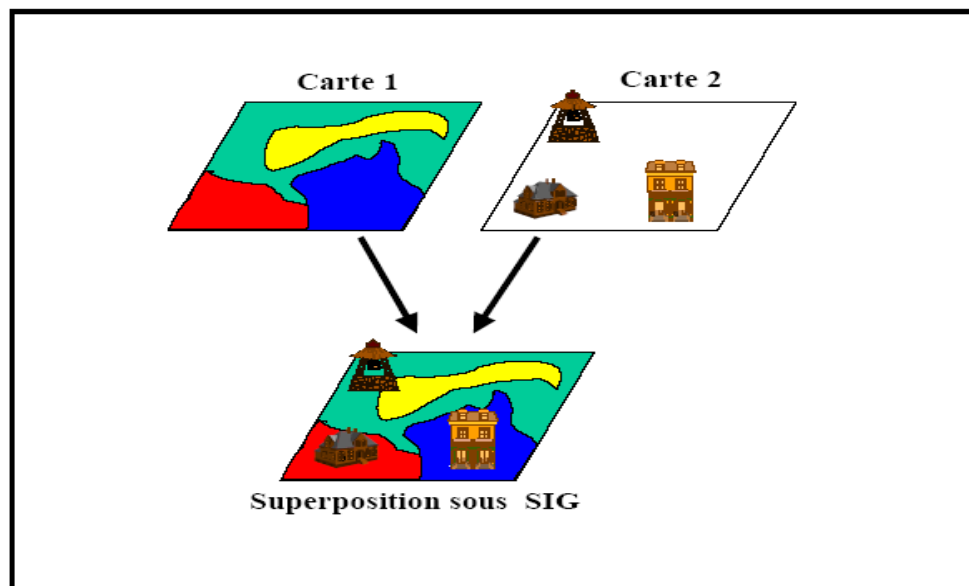


Figure 2. 5 Superposition dans un SIG (Abdelbaki. C, 2012)

2.8 Domaine d'application

- ✓ Cadastre (calcul de surface etc.).
- ✓ Travaux publics (la gestion topographique) et sur réseaux.
- ✓ Agriculture et forêt.
- ✓ La gestion des transports.
- ✓ Les risques majeurs (prévention des risques naturels et technologiques).
- ✓ La gestion des processus et des systèmes par similitude spatiale.

2.9 Quelques logiciels SIG

Pour une bonne organisation de l'information géographique, il faut utiliser les logiciels de système d'information géographique comme les suivants :

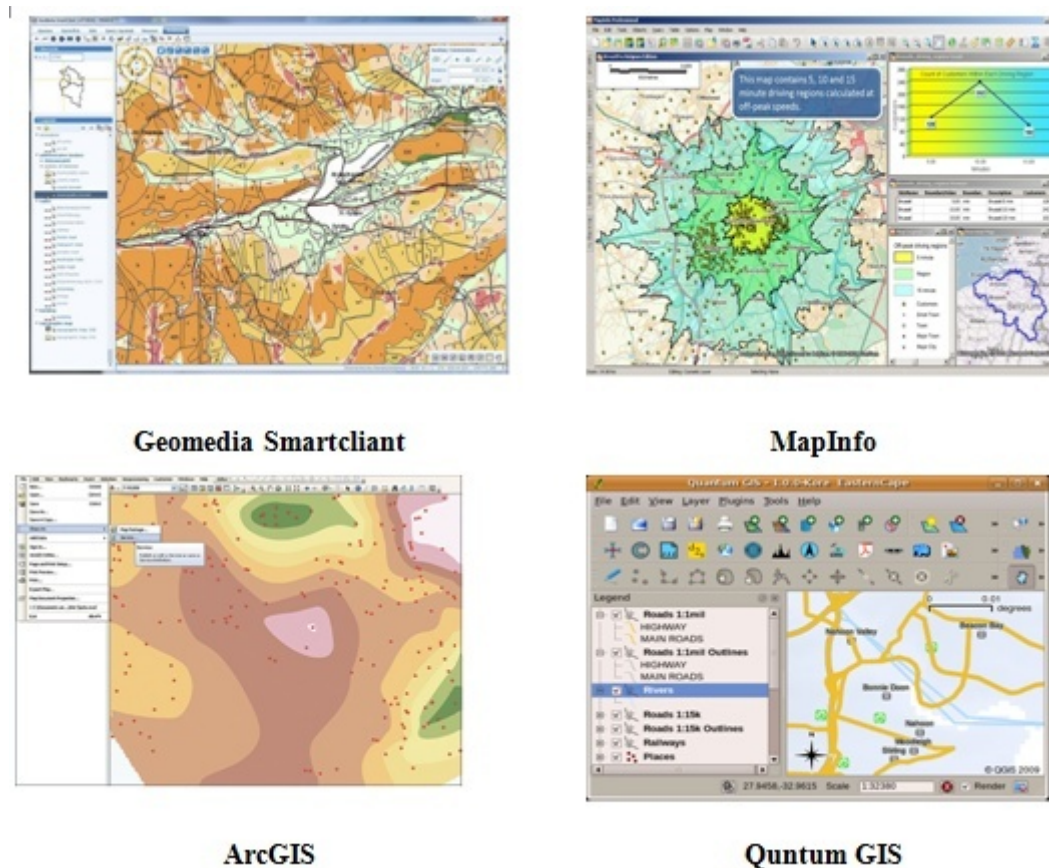


Figure 2. 6 Outils de SIG

2.10 Modes d'acquisition de données

Pour l'acquisition des données, on a besoin de :

- Numérisation ou digitalisation

Permet de faire un curseur sur un plan posé sur une table et les digitaliser et préalablement calé en coordonnées avec des signes précisent de l'ordre du dixième de millimètre.

- Balayage électronique ou scénarisation

Il est réalisé avec un scanner pour saisir un plan existant et plus rapide que la digitalisation.

- Photogrammétrie:

La photogrammétrie aérienne est utilisée pour constituer les cartes à moyenne échelle. Elle est également utilisée pour un coût qui peut être très avantageux pour la constitution de plans à grande échelle.

- Images satellitaires ou la télédétection :

Est un moyen très commode de créer les données à introduire dans les S.I.G qu'il s'agit d'enregistrer et transmise les images par le satellite dans des conditions particulières et rigoureuses.

- Import de fichier :

Convertir les coûts de saisie et récupérer des données existantes au format, au système d'unités et au système de projection souhaités après les réduire.

- Levé topographique :

Avec un théodolite, on peut mesurer les angles d'un triangle et les enregistrés plus un code d'identification qui définit la position de chaque point, ce qui facilite le dessin sur l'ordinateur.

La figure 2.7 donne représente un exemple de mode d'acquisition.

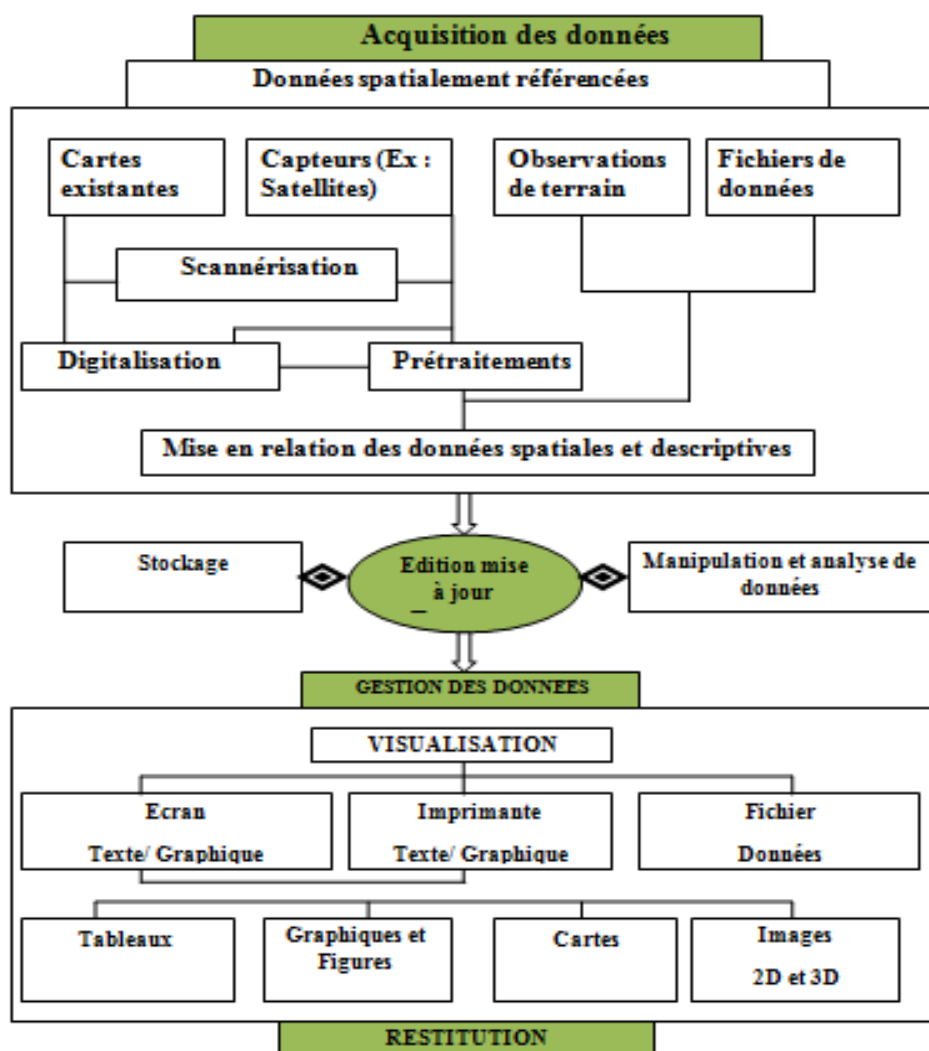


Figure 2. 7 Modes d'acquisition de données (Abdelbaki. C, 2012).

2.11 Les données dans un SIG

Pour que les données spatiales soient prêtes à utiliser par SIG, il faut être conscient des informations suivantes :

- Leur position sur le terrain.
- La topologie (les relations spatiales).
- Leur attribut (l'objet avec un code).

La figure ci-dessous représente les données dans un SIG.

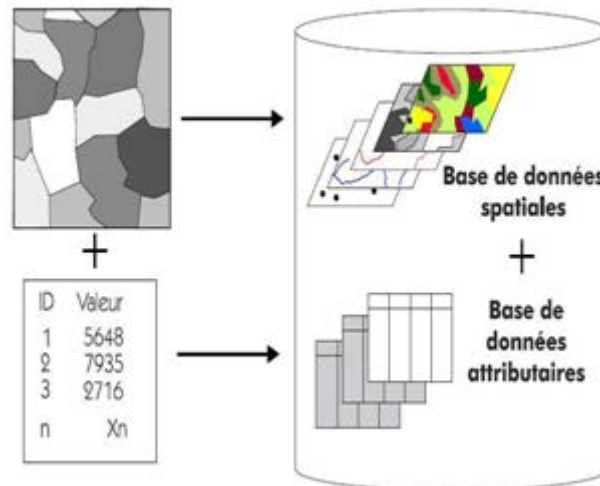


Figure 2. 8 Les données dans un SIG

2.11.1 Les données spatiales

Elles représentent toutes les caractéristiques des éléments graphiques soit :

- Les coordonnées par rapport à une échelle graphique de référence.
- point, ligne, polygone.
- longueur, périmètre, surface.

Elles sont présentées en deux formes :

- **mode raster : (le modèle matriciel)**

Par le procédé de scannage, la carte est transformée en une multitude de points singuliers, appelés pixels. Ces points stockés sous forme de valeurs numériques avec une information codée sur la couleur du point.

On trouve deux données raster :

- Les images.
- Les grilles.

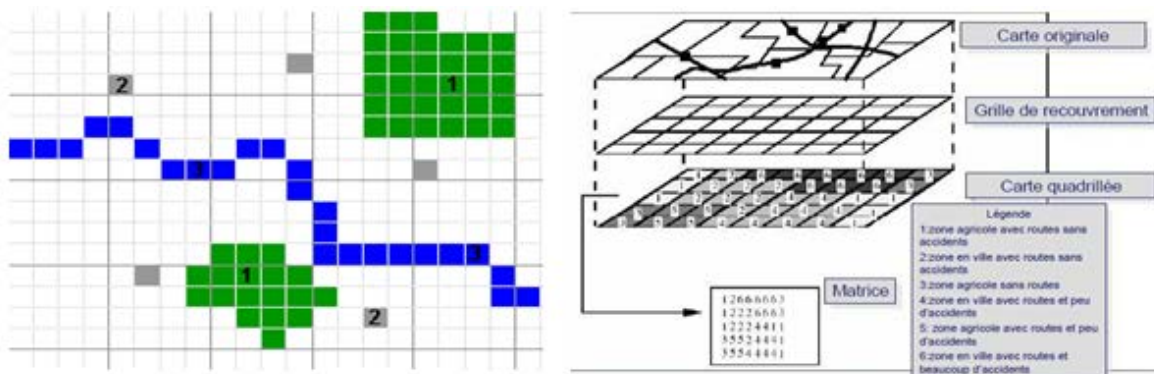


Figure 2. 9 Représentation en mode raster

- **mode vecteur**

Dans le mode vecteur, la géométrie de l'image de la carte est décrite par les éléments : point, ligne et surface. A chacun de ces éléments peut être associé une ou plusieurs informations (ligne=route, surface=bois). A partir de ces éléments et leurs attributs on peut faire des sélections selon des critères multiples.

On trouve trois données vectorielles :

- Données surfaciques : se forme d'un polygone comme les communes.
- Données linéaires : se forme des lignes comme les routes, les réseaux d'eau etc.
- Données ponctuelles : se forme des points comme les puits, les sondages etc.

La figure ci-dessous représente les deux composantes principales (graphique et attributive) de l'information géographique au format vecteur.

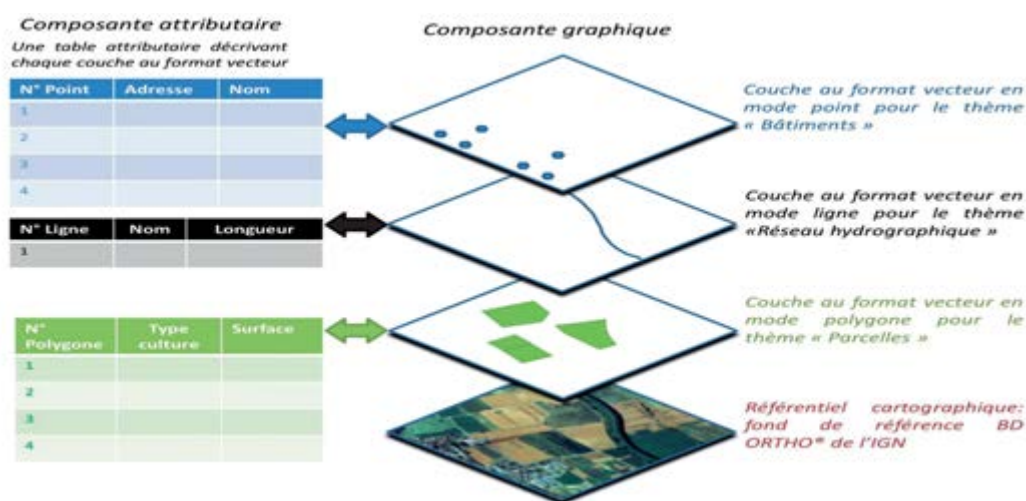


Figure 2. 10 Les deux principales composantes (graphique et attributive) de l'information géographique au format vecteur

2.11.2 Données associées

Elles complètent la représentation géométrique de l'entité spatiale.

Le code d'identification qui peut être numérique ou littéral envoyé par l'élément de l'espace est caractérisé en quelque sorte : le point, la ligne ou le polygone.

On distingue trois données associées :

* données de classification :

Elles permettent de ranger le point isolé, la ligne ouverte ou la ligne fermée.

* données d'identification :

Elles permettent d'individualiser chaque objet figurant sur le plan.

* données attributaires :

Elles viennent apporter une information supplémentaire comme le diamètre de la conduite etc. (Yacine. K, 2018).

2.12 La mise à jour des SIG

Au cours de l'évolution du monde réel, la réalisation d'une cellule de mise à jour devienne une étape essentielle pour un système d'information géographique dans son cycle de vie.

Le problème du temps de rafraîchissement de la base de données doit être posé de façon claire surtout dans un milieu urbain à dynamique rapide. C'est un des obstacles majeurs à l'utilisation optimale de l'outil SIG.

2.13 Conclusion

Un SIG (système d'information géographique) devient un outil préférable pour le traitement des informations spatiales sur l'ordinateur soit individuel ou portable afin de faciliter l'utilisation des données géographiques numériques et permettre la prise de décision d'une manière rapide puisque nous pouvons exploiter notre SIG en effectuant des analyses thématiques et des requêtes SQL.

Chapitre 3

Détermination du potentiel de liquéfaction

3.1 Introduction

Le présent chapitre a pour objectif l'évaluation du potentiel de liquéfaction à partir des méthodes de calcul basées sur les résultats des essais SPT et CPT.

3.2 Description des pénétromètres statiques et dynamiques CPT et SPT

3.2.1 Le pénétromètre statique (CPT)

L'essai de pénétration statique connu sous le nom générique de CPT (cône pénétration testing) d'après l'expression anglaise, est très répandu en France. Son origine remonte en 1920 aux USA, mais c'est surtout aux Pays Bas à partir de 1932 qu'il s'est rapidement développé, grâce aux activités du laboratoire des sols Delft. Il existe plusieurs types d'appareils qui se caractérisent par plusieurs facteurs à savoir : leurs puissances qui permettent de traverser les niveaux de sols les plus résistants et par le type de cône utilisé (cône mobile, cône fixe). (Chogueur. A, 2019).



Figure 3. 1 Pénétromètre statique

- **Principe de l'essai**

L'essai de pénétration statique (NF P94-113,1996 ; EN ISO 22476-1,2007 ; NA 2797,2009). Il consiste à enfoncer dans le sol un pieu-modèle réduit de 30 à 100 mm de diamètre, par véringage de manière continue avec une vitesse lente et constante de 2cm /s. la

résistance de pointe de pénétromètre permet d'estimer la capacité portante des fondations. On mesure directement :

- L'effort de pointe Q_c
- L'effort total d'enfoncement Q_t

- **Méthodes de mesure**

La résistance à l'enfoncement est mesurée tous les 10 cm aux maximum.

- **Sondage discontinu**

On enfonce le train de tiges jusqu'à la profondeur de mesure en contrôlant l'effort de pointe qui est alors mesuré en continu.

- **Sondage continu :**

On enfonce le pénétromètre sans mesurer l'effort total et en notant seulement l'effort de pointe qui est alors mesuré en continu.

- **Domaine d'application**

Cet essai s'applique sur la catégorie des sols fins et des sols grenus dont la dimension moyenne des éléments ne dépassant pas 20 mm. Il permet de déterminer approximativement la coupe géologique du terrain et le niveau d'essai de (s) :

- La fondation d'un immeuble ou d'un ouvrage d'art.
- Lignes TGV et autoroutes.
- Contrôle de traitement ou compactage de sol.

Les résultats issus s'expriment sur des graphiques appelés des pénétrogrammes sur lesquels on reporte en fonction de la profondeur :

- La résistance en pointe q_c .
- La résistance au frottement latéral F_s . (Chogueur. A, 2019).

3.2.2 Le pénétromètre dynamique au carottier (standard pénétration test SPT)

C'est un appareil constitué essentiellement par un train de tiges et équipé d'un système de mesures. A son extrémité inférieure, une pointe conique d'un diamètre supérieur à celui du train de tiges est placée

L'essai est d'utilisation courante dans les pays anglo-saxons et notamment aux USA, depuis les années 1930.

Il est connu par le nom Standard pénétration Test (SPT), il a été normalisé par (ASTM-D1586-11 et NF P94-11,1991).

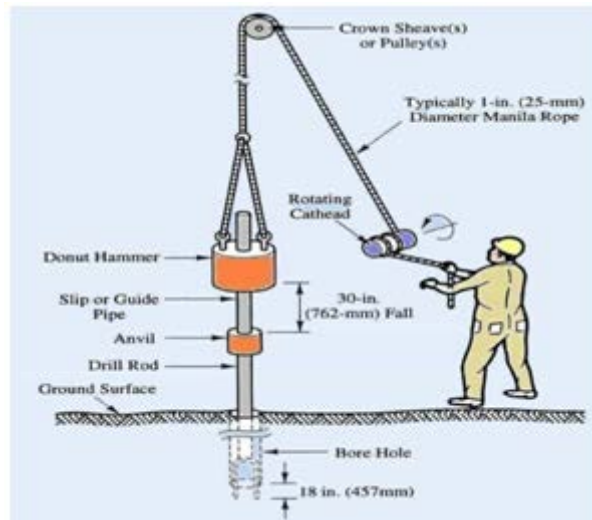


Figure 3. 2 Schéma d'un pénétromètre dynamique



Figure 3. 3 Pénétromètre dynamique

Principe de l'essai

Il consiste à enfoncer dans le terrain par battage un carottier de conception et de dimension normalisée.

1. On compte le nombre de coups de mouton nécessaires pour enfoncer le carottier sur une certaine profondeur.
2. Une fois plein, le carottier est remonté à surface vidé de sa carotte puis redescendu au fond du forage.
3. L'opération est répétée sur toute la hauteur du profil à tester.

4. L'essai permet d'une part de tracer un profil de pénétration et d'autre part de fournir des échantillons de sol remaniés qui peuvent servir à la reconnaissance des couches de sol traversées.
5. Par la suite les essais d'identification classiques peuvent être pratiqués (limites d'Atterberg, teneur en eau et granulométrie)
 - L'essai de pénétration au carottier (SPT) s'applique aux sols fins et aux sols grenus dont la dimension maximale des éléments ne dépasse pas 20 mm. il est limité à une profondeur de 50 m et il est conçu essentiellement pour déterminer la capacité portante d'un pieu et peut servir pour estimer la capacité portante d'une fondation superficielle.
 - L'essai est effectué à des intervalles de profondeurs réguliers compris entre 0,50 m et 1,50m. De préférence, un intervalle de 1 m est tout à fait apprécié.

L'essai nécessite l'appareillage suivant :

- Un équipement de forage et tenu de paroi
- Un dispositif de battage
- Un train de tiges et son guidage
- Un carottier
- Un système de mesure

Après réalisation du forage maintenu par une boue ou par un tubage, on fait y descendre le carottier puis on le frappe par un mouton de masse de 63 ,50 kg en trois étapes :

- Le nombre de coups de mouton N_i nécessaires à chaque enfoncement de 15 cm est relevé, soit :
- N_0 : enfoncement d'amorçage de 0 à 15 cm
- N_1 : premier enfoncement de 15 à 30 cm supplémentaire
- N_2 :deuxième enfoncement de 30 à 45 cm supplémentaire
- Le nombre $N=N_1+N_2$ est appelé résistance à la pénétration

Lorsqu'un nombre de coups supérieur à 50 ne permet pas d'obtenir un enfoncement de 15 cm, l'essai est arrêté et l'enfoncement correspondant est noté. (Chogueur. A, 2019).

3.3 L'évaluation de la liquéfaction

Le but de l'évaluation du potentiel de liquéfaction est de déterminer le facteur de sécurité à partir de résistance cyclique (CRR) et de contrainte cyclique générée par le séisme (CSR). Il est donné par la relation suivante :

$$FS = CRR/CSR \quad [3.1]$$

D'après le RPA 99 version 2003, Si : $FS > 1$: le sol n'est pas susceptible à la liquéfaction.

$FS < 1$: il y a un risque de liquéfaction.

$1 < FS < 1.25$: Moyenne susceptibilité de liquéfaction.

3.3.1 La détermination du rapport de la résistance cyclique CRR

Les méthodes utilisées pour déterminer la résistance de liquéfaction est utilisant les données obtenues à partir d'essais in-situ (SPT, CPT, DMT, et la mesure des vitesses d'ondes de cisaillement...), ou à partir d'essais de laboratoire (Triaxial cyclique, cisaillement simple...). Les corrélations de CRR basées sur l'évaluation du comportement des dépôts suite aux séismes correspondent à une magnitude de référence de 7,5. Elles correspondent aussi à des terrains plats, et à des contraintes verticales effectives de l'ordre de 100 kPa.

Kramer (1996), a proposé de tenir compte de l'effet de la contrainte de cisaillement initiale, dépendant de la pente du dépôt, et de la contrainte effective verticale supérieure à 100 kPa, en corrigeant la valeur de CRR comme suit:

$$CRR = CRR_{7.5} \times K_m \times K_\sigma \times K_\alpha [3.2]$$

On mentionne trois facteurs important, le facteur d'échelle K_m , le facteur de correction pour grandes pressions de surcharge K_σ et le facteur K_α pour tenir en compte des contraintes de cisaillement importantes dues aux inclinaisons du sol.

- Seed et Idriss ont proposé l'équation suivante pour le calcul de K_m :

$$K_m = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}} [3.3]$$

Pour la détermination de K_σ :

- 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 :

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{Pa} \right)^{f-1} [3.4]$$

K_σ : facteur de correction de contrainte verticale effective ($K_\sigma=1$ pour $\sigma'_{vo} < 100$ kpa)

P_a : est la pression atmosphérique ($P_a= 100$ kpa)

f : dépend de la densité relative (D_r).

Pour $40\% \leq D_r \leq 60\%$ $\rightarrow 0.7 \leq f \leq 0.8$

Pour $60\% \leq D_r \leq 80\%$ $\rightarrow 0.6 \leq f \leq 0.7$.

- Boulanger et Idriss (2004) ont à leur tour révisé la valeur de K_σ :

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1 \quad [3.5]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 17.3D_r} \\ \text{ou} \\ C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N1)_{60}}} \\ \text{ou} \\ C_\sigma = \frac{1}{37.8 - 8.27(q_{c1}N)^{0.264}} \end{array} \right. \quad [3.6]$$

C_σ : facteur de correction ($C_\sigma < 0.3$)

D_r : la densité relative

$(N1)_{60}$: la valeur corrigée de SPT-N

q_{c1N} : La résistance de pointe corrigée.

3.3.2 Détermination du rapport de contrainte cyclique CSR

Une colonne du sol à une largeur et une longueur unitaires et se déplace horizontalement comme un corps rigide sous l'effet d'un tremblement de terre.

La force horizontale maximale agissant sur la colonne de sol est donnée par la loi fondamentale de la dynamique comme suit :

$$F = m \cdot a = \left(\frac{W}{g}\right) \cdot a = \left(\frac{\gamma \cdot Z}{g}\right) \cdot a_{\text{Max}} = \sigma_{vo} \cdot \left(\frac{a_{\text{Max}}}{g}\right) \quad [3.7]$$

F : la force sismique horizontale exercée sur la colonne du sol en (KN)

m : la masse totale de la colonne (Kg)

W : le poids total de la colonne du sol en (KN)

γ : le poids volumique total de colonne du sol en (KN/m³)

Z : la profondeur de la colonne du sol (m)

a_{max} : L'accélération maximale induite par le tremblement de terre en (m/s²)

g : l'accélération de la pesanteur (m/s²)

σ_{vo} : la contrainte verticale en (KPa)

La force horizontale maximale F égale à la force de cisaillement maximale à la base τ_{max} alors :

$$\tau_{max} = F = \sigma_{vo} \cdot \left(\frac{a_{Max}}{g} \right) [3.8]$$

Si on divise les deux côtés de l'équation par σ'_{vo} , on trouve :

$$\frac{\tau_{max}}{\sigma'_{vo}} = \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot \left(\frac{a_{Max}}{g} \right) [3.9]$$

Puisque la colonne de sol n'agit pas en tant que corps rigide pendant le tremblement de terre, mais plutôt le sol est déformable, Seed et Idriss (1971) ont incorporé un facteur r_d de réduction de profondeur au côté droit de l'équation [3.9] ou :

$$\frac{\tau_{max}}{\sigma'_{vo}} = r_d \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot \left(\frac{a_{Max}}{g} \right) [3.10]$$

Seed et al (1975) ont converti le diagramme qui représente la contrainte de cisaillement due aux sollicitations sismiques en un diagramme «équivalent» de N cycles, d'amplitude constante.

La contrainte de cisaillement cyclique du séisme à une profondeur considérée est exprimée comme suit : $\tau_{cyc} = 0.65 \tau_{max}$ [3.11]

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

La substitution de l'équation (3.11) dans de l'équation (3.10), le CSR induit par tremblement de terre est obtenu comme suit :

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \cdot \left(\frac{a_{Max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d [3.12]$$

CSR : le rapport de contrainte cyclique (sans dimensions).

σ_{vo} : la contrainte verticale totale (KPa)

σ'_{vo} : la contrainte verticale effective (KPa)

a_{max} : l'accélération maximale du sol en surface due à l'effet sismique (m/s^2)

g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2)

r_d : Facteur de réduction de profondeur, également connu sous le nom de coefficient de réduction de contrainte (sans dimensions).

La figure ci-dessous représente la courbe de coefficient du facteur r_d .

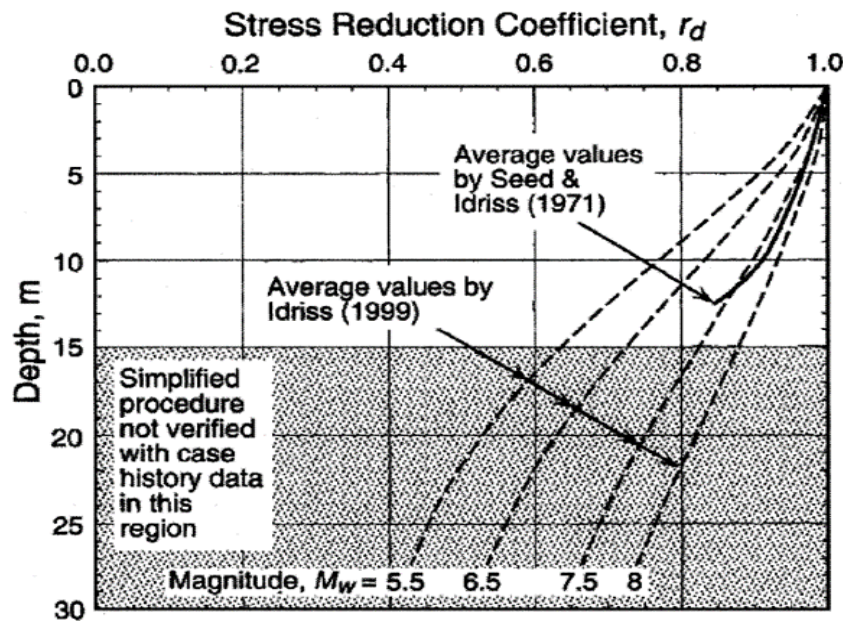


Figure 3. 4 Courbe du facteur de réduction (r_d).

La figure (3.4) présente la gamme en valeurs pour le facteur r_d de réduction de profondeur contre la profondeur au-dessous de surface de sol. Noter qu'avec la profondeur, le facteur de réduction de profondeur diminue pour expliquer le fait que le sol n'est pas un corps rigide, mais plutôt déformable.

Plusieurs modèles ont été proposés pour calculer le facteur de réduction, pour les projets de faible risque, les équations suivantes peuvent être utilisées pour la détermination de facteur r_d .

- Lia et Whithman (1986) ont proposés les relations suivantes :

$$\begin{cases} r_d = 1 - 0.00765Z & \text{pour } Z \leq 9.15 \text{ m} \\ r_d = 1.174 - 0.0267Z & \text{pour } 9.15 < Z \leq 23 \text{ m} \end{cases} \quad [3.13]$$

- Blacke (1999) a proposé une seule équation :

$$r_d = \frac{(1 - 0.4113 \times Z^{0.5} + 0.04052 \times Z + 0.001753 \times Z^{1.5})}{(1 - 0.4177 \times Z^{0.5} + 0.05729 \times Z - 0.006205 \times Z^{1.5} + 0.001210 \times Z^2)} \quad [3.14]$$

- Au Japon, r_d est simplement pris égal à :

$$r_d = 1 - 0.0015 \times Z \quad [3.15]$$

L'approche simplifiée pour l'évaluation de CRR est basée sur une magnitude de référence

$M_w = 7,5$. Un coefficient MSF (Magnitude Scaling Factor), est utilisé pour obtenir la valeur corrigée de CSR correspondant à un séisme de magnitude M_w différente de 7,5. Le coefficient MSF est calculé à partir de la corrélation entre le nombre de cycles de contraintes uniformes équivalents et la magnitude du séisme d'une part, et des relations obtenues au laboratoire entre le CSR requis pour causer la liquéfaction et le nombre de cycles de contraintes uniformes.

Le CSR induit par tremblement de terre de magnitude de 7.5 est obtenu comme suit :

$$CSR_{7.5} = 0.65 \cdot \left(\frac{a_{Max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot \left(\frac{r_d}{MSF} \right) = \frac{CSR}{MSF} \quad [3.16]$$

La formule de MSF donnée par Youd et Idriss (2001) comme suit :

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56} \quad [3.17]$$

Idriss et Boulanger (2004), après l'examen de toutes les relations, ont adopté celle explicitée par l'équation [3.18]. Lorsqu'ils utilisent la combinaison avec les formules qui relient r_d à z et à la magnitude M_w et non uniquement à la profondeur, elle fournira des résultats plus conservateurs, surtout dans le cas des faibles profondeurs :

$$MSF = 6.9 \exp \left(\frac{-M_w}{4} \right) - 0.058 \leq 1.8 \quad [3.18]$$

3.3.3 Évaluation du facteur de sécurité (FS)

L'évaluation du risque de liquéfaction est fondé sur la définition d'un facteur de sécurité FS qui est défini comme le rapport entre la résistance cyclique normalisée du matériau, CRR (Rapport de Résistance Cyclique), et la sollicitation cyclique normalisée induite par le séisme à la même profondeur, CSR (Rapport de Contrainte Cyclique) :

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} * MSF \cdot K_{\sigma} \quad [3.19]$$

On considère, en général, un coefficient de sécurité nécessaire strictement supérieur à 1 pour s'affranchir du risque de liquéfaction. A l'inverse, un coefficient de sécurité inférieur ou égal à 1 traduit généralement un risque important de liquéfaction.

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

$$MSF = \left(\frac{MW}{7,5}\right)^{-2,56} \quad [3.20]$$

Avec :

Mw : La magnitude du séisme.

Youd et al. (2001) proposent l'expression suivante pour calculer le facteur $K\sigma$.

$$K\sigma = \left(\frac{\sigma_v'0}{pa}\right)^{f-1} [3.21]$$

Avec :

$K\sigma$: facteur de correction du au poids des terres appliqué au CRR7.5

Pa : pression atmosphérique égale 100 KPa.

$\sigma_v'0$: contrainte effective verticale (KPa).

f: est en fonction de densité relative.

f varie de 0.7 à 0.8 pour $40\% \leq Dr \leq 60\%$ [3.22]

f varie de 0.6 à 0.7 pour $60\% \leq Dr \leq 80\%$

Boulangier et Idriss (2004) ont proposé une formule révisée :

$$K\sigma = 1 - C\sigma \cdot \ln\left(\frac{\sigma_v'0}{pa}\right) \leq 1 \quad [3.23]$$

Avec :

$C\sigma$: Facteur de correction ($C\sigma < 0.3$).

Dr : la densité relative.

(N1)60 : la valeur corrigée de N_{spt} .

qc_{1N} : La résistance de pointe corrigée.

3.3.4 Estimation de la probabilité de liquéfaction (P_L)

La dernière étape, Après avoir déterminé le facteur de sécurité F_S on va estimer la probabilité de la liquéfaction par les relations suivantes :

Pour un seul sondage :

$$P_L = \int_0^H F_L \left(10 - \frac{z}{2}\right) dz = \sum_{i=1}^N (10 - 0.5Z_i) F_{Li}(H_{i+1} - H_i) [3.24]$$

Telle que :

$$\begin{cases} F_L = 1 - F_S & \text{si } F_S \leq 1 \\ F_L = 0 & \text{si } F_S > 1 \end{cases} \quad [3.25]$$

Pour tout le site :

$$P_{LMoy} = \frac{\sum_i^N P_L}{N} \quad [3.26]$$

Juang et al ont proposés une classification du potentiel de liquéfaction qui ce présent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3. 1 La classification de la probabilité de liquéfaction. (Juang et al, 2012)

Probabilité	Classe	Description (Probabilité de liquéfaction)
$85 < P_L < 100$	5	Presque certain qu'il va se liquéfier
$65 < P_L < 85$	4	Liquéfaction très probable
$35 < P_L < 65$	3	Liquéfaction et non-liquéfaction également susceptible
$15 < P_L < 35$	2	liquéfaction peu probable
$0 < P_L < 15$	1	Presque certain que le sol ne sera pas liquéfié

3.4 Conclusion

La résistance à la liquéfaction des sols est en général évaluée à partir des méthodes et des procédures développées en se basant sur des essais in situ. Les essais SPT et CPT sont les plus fréquents à cause de leur efficacité.

Ces méthodes qui se reposent sur le calcul d'un facteur de sécurité FS (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.

Chapitre 4
Cartographie du risque de liquéfaction
(Site de Mostaganem)

4.1 Introduction

L'objectif annoncé dans ce chapitre est de présenter en détail le site d'étude (site Mostaganem). Dans un premier temps, le contexte géologique et géotechnique du projet sont analysés. Nous présenterons par la suite les résultats des investigations géotechniques basés sur les sondages carottés, les essais statiques et les essais dynamiques.

La liquéfaction est un problème qui nécessite plusieurs études très précises, que ce soit in-situ ou en laboratoire en utilisant plusieurs méthodes. La réalisation des cartes des risques de liquéfaction sur le site en question est traitée dans ce chapitre.

4.2 Présentation du site

Le site de projet a été localisé à la plage Sonachter à côté de la station de dessalement des eaux de mer et à l'Est de la ville de Mostaganem, bornée à l'Est de la route numéro 11, C'est une route nationale côtière algérienne de 418 km.

Elle relie Alger à Oran en longeant la mer méditerranée, et une habitation d'Aizeb. Le site est borné aussi en Ouest par la mer méditerranée, et au Sud nous avons l'extension de la station de dessalement. Avec un terrain qui est plat plus quelques dunes de sable (Figure 4.1). La figure ci-dessous représente la carte de situation du projet.



Figure 4. 1 Situation du projet (GOOGLE EARTH, 2021)

4.2.1 La sismicité

D'après le règlement parasismique Algérien (RPA 99 version 2003), la wilaya de Mostaganem est située dans une zone de moyenne sismicité (zone II).

4.2.2 Contexte géologique

Le plateau « grès-sableux » de Mostaganem qui interrompu au Nord par la vallée du Chélif couvre entièrement la feuille de la wilaya et celle de Belle – cote qui lui fait suite dans l'angle Nord – Est. Il présente quelques saillies s'élèvent à 389 mètres au Djebel Trek el Touires. Son altitude moyenne est de 200 mètres, la vallée qui se resserre en une gorge profonde coupe l'arrêt de Quartzites et les formations de l'Oligocène et du Miocène inférieur qui marquent l'extrémité occidentale du Dahra et qui manquent plus au sud.

Au sud, les marnes sahéliennes qui affleurent sous le Pliocène et probablement aussi par le Trias, ont constituée les grès de plateau de Mostaganem.

Le terrain est constitué d'un dépôt en sable plus ou moins argileux avec un substratum Pliocène marneux au niveau inférieur des résultats d'anciennes plages émergées.

4.3 Programme des reconnaissances géotechniques

En vue d'identifier la lithologie du terrain, d'évaluer l'état de compacité et d'identifier les paramètres géotechniques et géophysiques en place, le site étudié a fait l'objet d'une campagne de reconnaissance comprenant des essais de laboratoire et des essais in situ.

Les essais exécutés sont : (Figure 4.2)

- Huit (08) sondages carottés avec mesure systématique SPT : sc01, sc02, sc04, sc06, sc08, sc10, sc11, sc12 dans les formations pulvérulentes, dans :
- Quatre (04) sondages de 30 m de profondeurs, des essais Down Hole ont été réalisés avec un pas de 01
- Quatre (04) sondages de 20 m de profondeur ont été équipés de piézomètre
- Quatre (04) essais au pénétromètre statique CPT poussés jusqu'au refus, sc03, sc05, sc07, sc09.



Figure 4. 2 L'implantation des sondages dans le site d'étude.

4.4 Résultats des reconnaissances géotechniques

Les différents sondages carottés réalisés sur le site ont mis en évidence essentiellement les formations géologiques suivantes :

- Un sable fins avec un peu de silt de couleur jaunâtre à verdâtre, carbonatés avec un peu de graviers, des restes de mollusques, avec présence par endroit de passages d'ordre centimétriques de vases plastique de couleur grisâtre.
- L'épaisseur de ces sables est variable et décroît dans le sens Nord – Sud, c'est-à-dire tout en s'éloignant de la mer.

4.5 Exploitation des résultats des sondages carottés

- La réalisation des sondages carottés dans le cadre du projet de la centrale électrique a permis d'établir de haut en bas les coupes lithologiques des formations géologiques suivantes :
- **Formation de recouvrement** : Il s'agit de sables fins avec un peu de silt de couleur jaunâtre à verdâtre, carbonatés avec un peu de graviers, des restes de mollusques, avec présence par endroit de passages d'ordre centimétriques de vases plastique de couleur grisâtre, l'épaisseur de ces sables est variable et décroît dans le sens Nord – Sud, c'est-à-dire tout en s'éloignant de la mer.
- **Bancs de grés calcaires** : Sous ces sables, on note la présence par endroit de bancs de grès à ciment calcaire ocre à jaunâtre d'ordre centimétrique, très dur, avec des joints fermés horizontaux. Ces bancs de grés calcaire sont signalés de plus en plus en s'éloignant de la mer et en se rapprochant de la montagne.

- **Marnes grise indurées** : Un substratum marneux induré de couleur grise claire avec des cassures conchoïdales d'aspect rocheux. Le tableau 4.1 représente la Nature lithologique des couches constituant le terrain pour les sondages SPT.

Tableau 4. 1 La nature lithologique des couches constituant le terrain (D'après L.C.T.P, Mostaganem, 2014)

Sondages	Profondeur(m)	Nature du sol
Sc 01	0.00–9.50m	Sable fin jaunâtre carbonate
	9.50–20.00m	Sable fin verdâtre à gris clair argileux carbonaté
Sc 02	0.00–15.50m	Sable fin jaunâtre carbonate
	15.50–20.00m	Marne finement sableuse grise verdâtre
	20.00–20.50m	Grès conglomératique ocre à jaunâtre de moyenne qualité
	20.50–30.00m	Marne grise claire indurée avec des cassures conchoïdales
Sc 04	0.00–9.50m	Sable fin jaunâtre carbonate
	9.50–12.00m	Grès conglomératique ocre à jaunâtre de moyenne qualité
	12.00–30.00m	Marne grise claire indurée avec des cassures conchoïdales
Sc 06	0.00–15.50m	Sable fin jaunâtre carbonate
	15.50–19.90m	Sable fin argileux carbonaté gris verdâtre à jaunâtre avec des traces de matière organique
	19.90–20.00m	Marne grise claire indurée avec des cassures conchoïdales
Sc 08	0.00–6.50m	Sable fin jaunâtre carbonate
	6.50–18.50m	Sable fin gris verdâtre peu argileux
	18.50–30.00m	Marne grise bleuâtre indurée avec des cassures conchoïdales d'aspect rocheux
Sc 10	0.00–3.00m	Sable fin rougeâtre graveleux
	3.00–13.50m	Sable fin jaunâtre
	13.50–30.00m	Marne grise bleuâtre indurée avec des cassures conchoïdales d'aspect rocheux
Sc 11	0.00–13.50m	Sable fin jaunâtre
	13.50–14.00m	Passage de grès à ciment calcaire ocre à jaunâtre de bonne qualité
	14.00–20.00m	Marne grise bleuâtre indurée avec des cassures conchoïdales d'aspect rocheux
Sc 12	0.00–17.00m	Sable fin jaunâtre carbonate
	17.00–21.00m	Sable fin jaunâtre à verdâtre
	21.00–30.00m	Marne grise bleuâtre indurée avec des cassures conchoïdales d'aspect rocheux

4.6 Résultats du test de pénétration standard SPT

Le calcul du nombre de coups exact mesuré par l'essai S.P.T : Les valeurs brutes obtenues N1, N2 et N3 de l'essai S.P.T réalisés et dont, seules les valeurs N2 et N3 seront prises en considération, car la valeur N1 correspond à la partie remaniée du sol et donc à éliminer, ainsi la valeur de NSPT que nous prendrons en considération sera : $NSPT = N2 + N3$ (Moradi et al, 2011). Le nombre NSPT est appelé résistance à la pénétration. (Tableau 4.2).

Tableau 4. 2 Les valeurs brutes des essais SPT (N1, N2, N3) (D'après le L.C.T.P, Mostaganem, 2014)

Sondages	Profondeur (m)	N1	N2	N3	$N_{SPT}=N2+N3$	Classification du sol selon la Norme XP P94-011
Sc 01	3.00-3.45m	06	08	11	19	Sol moyennement dense
	6.00-6.45m	11	13	17	30	Sol moyennement dense
	9.00-9.45m	10	11	25	36	Sol dense
	15.00-18.45m	16	17	26	43	Sol dense
	18.00-18.45m	17	23	28	51	Sol très dense
Sc 02	3.00-3.45m	06	17	20	37	Sol dense
	6.00-6.45m	17	19	20	39	Sol dense
	9.00-9.45m	15	12	25	37	Sol dense
	12.00-12.45m	08	13	25	37	Sol dense
	15.00-15.45m	10	12	19	31	Sol dense
	18.00-18.45m	08	12	15	27	Sol moyennement dense
Sc 04	3.00-3.45m	09	15	25	39	Sol dense
	6.00-6.45m	11	17	27	44	Sol dense
	9.00-9.45m	12	17	25	42	Sol très dense
Sc 06	3.00-3.45m	09	13	18	31	Sol dense
	6.00-6.45m	12	15	20	35	Sol dense
	9.00-9.45m	15	18	27	45	Sol dense
	12.00-12.45m	08	12	16	28	Sol moyennement dense
	15.00-15.45m	13	15	22	37	Sol dense
	18.00-18.45m	11	17	25	41	Sol dense
Sc 08	3.00-3.45m	08	13	23	36	Sol dense
	6.00-6.45m	10	15	25	39	Sol dense
	9.00-9.45m	07	17	16	33	Sol dense
	12.00-12.45m	17	19	20	39	Sol dense
	15.00-15.45m	12	18	27	45	Sol dense
	18.00-18.45m	15	18	27	45	Sol dense
Sc 10	3.20-3.65m	10	13	21	34	Sol dense
	5.55-6.00m	09	13	19	32	Sol dense
	9.05-9.50m	08	15	25	38	Sol dense
	11.55-12.00m	11	15	25	40	Sol dense
Sc 11	2.55-3.00m	09	15	21	36	Sol dense
	5.55-6.00m	11	17	24	41	Sol dense
	8.55-9.00m	13	18	27	45	Sol dense
	11.55-12.00m	15	17	26	43	Sol dense
Sc 12	3.00-3.45m	08	12	18	30	Sol moyennement dense
	6.00-6.45m	09	13	19	32	Sol dense
	9.45-10.00m	12	16	19	35	Sol dense
	12.00-12.45m	08	16	21	37	Sol dense
	18.00-18.45m	11	16	20	36	Sol dense
	20.45-21.00m	12	17	25	41	Sol dense

4.7 Evaluation du potentiel de liquéfaction à partir des résultats de l'essai SPT et CPT

4.7.1 L'essai SPT

❖ Calcul du facteur de sécurité

Le sol est supposé être liquéfiable si le facteur de sécurité $F_s < 1$, et il est non liquéfiable si $F_s > 1.25$. Moyenne susceptibilité pour $1 < F_s < 1.25$, selon le **RPA 99 corrigé en 2003**, le coefficient de sécurité est de 1.25.

- Pour le calcul de la contrainte cyclique CSR on a utilisé :
 - L'équation [3.12] de Seed et Idriss (1971), pour la détermination de CSR
 - Une accélération maximale égale à 0.3g, selon le (RPA 99 version 2003).
 - L'équation [3.13] Lia et whithman (1986), pour la détermination du rd selon la profondeur.
- Pour le calcul de la résistance cyclique CRR on a utilisé :
 - L'équation suivante d'Idriss et Boulanger (2006) pour la détermination de CRR7.5 :

$$CRR_{7.5} = \exp \left[\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} \right) + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right] \quad [4.1]$$

- pour déterminer $(N_1)_{60}$:

$$N_{60} = N \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad [4.2]$$

N : le nombre des coups non corrigés adoptés dans le SPT

C_N : facteur de correction de la contrainte de sols sus-jacents

C_E : facteur de st la correction du taux d'énergie de la masse

C_B : facteur de correction du diamètre du forage

C_R : facteur de correction de la longueur du train de tiges

Le tableau 4.3 représente les facteurs de correction utilisée dans notre étude.

Tableau 4. 3 Les facteurs de correction (Skempton et all, 1986)

Facteur	Terme	Equipement variable	Correction
Rapport d'énergie	$C_E = \frac{ER}{60\%}$	Mouton en Donut Mouton de sécurité Mouton automatique	0,5 à 1,0 0,7 à 1,2 0,8 à 1,3
Diamètre de forage	C_B	65 mm à 115 mm 150 mm 200 mm	1.00 1.05 1.15
Longueur de train de tige	C_R	3m à 4 m 4 m à 6 m 6 m à 10 m 10 m à 30 m > 30 m	0.75 0.85 0.95 1.00 < 1.00
Méthode de carottage	C_S	Carottage standard Carottage sans revêtement	1.00 1.1 à 1.3

Pour la détermination de $(N_1)_{60cs}$, l'équation de Seed et Idriss (1997) est utilisée:

$$(N_1)_{60CS} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad [4.3]$$

- Pour le calcul du facteur de sécurité F_s on a utilisé l'équation [3.2].
- Le sol est supposé être liquéfiable si le facteur de sécurité $F_s < 1$, et il est non liquéfiable si $F_s > 1.25$. Moyenne susceptibilité pour $1 < FS < 1.25$, selon le **RPA 99 corrigé en 2003**, le coefficient de sécurité est de 1.25. (Souad. B et Djawed. Z, 2016). Les résultats de calcul pour les différents sondages sont montrés dans les tableaux suivants :

Tableau 4. 4 Résultats des calculs pour le sondage N°01

Sondage N°01	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre carbonaté	3,225	0,325	0,478	0,681
	6,225	0,411	0,467	0,880
	9,225	0,387	0,455	0,852
Sable fin verdâtre à gris claire argileux carbonaté	15,225	0,220	0,307	0,755
	18,225	0,166	0,275	0,670

Tableau 4. 5 Résultats des calculs pour le sondage N°02

Sondage N°02	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre carbonaté	3,225	0,619	0,478	1,294
	6,225	0,499	0,467	1,068
	9,225	0,374	0,454	0,823
	15,225	0,444	0,376	1,180
Marne finement sableuse grise verdâtre	18,225	0,234	0,275	0,850

Tableau 4. 6 Résultats des calculs pour le sondage N°04

Sondage N°04	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre carbonaté	3,225	0,601	0,478	1,257
	6,225	0,615	0,467	1,317
	9,225	0,359	0,454	0,789

Tableau 4. 7 Résultats des calculs pour le sondage N°06

Sondage N°06	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre carbonaté	3,225	0,542	0,478	1,134
	6,225	0,439	0,467	0,941
	9,225	0,519	0,455	1,142
	15,225	0,294	0,376	0,783
Sable fin verdâtre à gris claire argileux carbonaté	18,225	0,171	0,275	0,690

Tableau 4. 8 Résultats des calculs pour le sondage N°08

Sondage N°08	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre carbonaté	3,225	0,635	0,478	1,328
	6,225	0,496	0,467	1,062
Sable fin gris verdâtre peu argileux	9,225	0,316	0,371	0,851
	15,225	0,334	0,307	1,087
	18,225	0,286	0,275	1,039

Tableau 4. 9 Résultats des calculs pour le sondage N°10

Sondage N°10	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin rougeâtre graveleux	3,425	0,500	0,477	1,048
	5,775	0,323	0,468	0,689
Sable fin jaunâtre	9,275	0,286	0,454	0,6301
	11,775	0,247	0,421	0,585

Tableau 4. 10 Résultats des calculs pour le sondage N°11

Sondage N°11	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre	2,775	0,604	0,480	1,25
	5,775	0,458	0,468	0,978
	8,775	0,396	0,457	0,867
	11,775	0,295	0,421	0,699

Tableau 4. 11 Résultats des calculs pour le sondage N°12

Sondage N°12	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre carbonaté	3,225	0,447	0,478	0,935
	6,225	0,310	0,467	0,664
	9,225	0,226	0,447	0,505
	15,225	0,022	0,337	0,065
Sable fin verdâtre à gris claire argileux carbonaté	18,225	0,447	0,478	0,935

4.7.2 L'essai CPT

- Pour le calcul de la contrainte cyclique CSR on a utilisé :
 - L'équation [3.12] de Seed et Idriss (1971), pour la détermination de CSR
 - Une accélération maximale égale à 0.3g, selon le (RPA 99 version 2003).
 - L'équation [3.13] Lia et whithman (1986), pour la détermination du rd selon la profondeur.
- Pour le calcul de la résistance cyclique CRR on a utilisé :
 - L'équation suivante de Robertson et Wride (1998) pour la détermination de CRR :

$$CRR = \begin{cases} 0.833 \left(\frac{q_{c1N,cs}}{100}\right) + 0.05 & \text{pour } q_{c1N,cs} < 50 \\ 93 \left(\frac{q_{c1N,cs}}{100}\right)^3 + 0.08 & \text{pour } 50 \leq q_{c1N,cs} < 160 \end{cases} \quad [4.4]$$

- L'équation suivante pour le facteur K_c :

$$\begin{cases} K_c = 1 & \text{pour } I_c \leq 1.64 \\ K_c = -0.403I_c^4 + 5.58I_c^3 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88 & \text{pour } I_c > 1.64 \end{cases}$$

- L'équation suivante pour la résistance de la pointe corrigée q_{c1N} :

$$q_{c1N} = c_Q \cdot \frac{q_c}{P_a} [4.5]$$

- L'équation [3.32] pour déterminer $(q_{c1N})_{cs}$:

$$(q_{c1N}) = K_c \times q_{c1N} [4.6]$$

Où K_c : un facteur de correction qui est fonction des caractéristiques des particules du sol.

q_{c1N} : La résistance de pointe corrigée.

*Pour le calcul du facteur de sécurité on a utilisé l'équation [3.1].

Tableau 4. 12 Résultats des calculs pour le sondage N°03

Sondage N°03	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre carbonaté	3	0,150	0,479	0,313
	6	0,112	0,467	0,240
	9	0,126	0,456	0,277
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	11	0,099	0,435	0,227
	14	0,130	0,397	0,327

Tableau 4. 13 Résultats des calculs pour le sondage N°07

Sondage N°07	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre carbonaté	3	0,123	0,479	0,258
	6	0,101	0,467	0,217
	9	0,105	0,432	0,243
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	11	0,114	0,399	0,287
	15	0,100	0,340	0,296

Tableau 4. 14 Résultats des calculs pour le sondage N°09

Sondage N°09	Z(m)	CRR	CSR	FS
Sable fin jaunâtre carbonaté	3	0,152	0,479	0,317
	6	0,102	0,467	0,218
	9	0,092	0,421	0,219
Sable fin gris noirâtre avec des débris de coquille marine	11	0,106	0,391	0,271
	13	0,101	0,362	0,280

A partir des résultats du calcul du coefficient de sécurité déterminé précédemment, des cartes montreront le risque de la liquéfaction sur le site en considération en se basant sur le logiciel Mapinfo et ArcGis pour les profondeurs Z=3m, Z= 6m, Z= 9m et Z=18m

La figure 4.3 montre la distribution du coefficient de sécurité en surface pour une profondeur de 3 m.

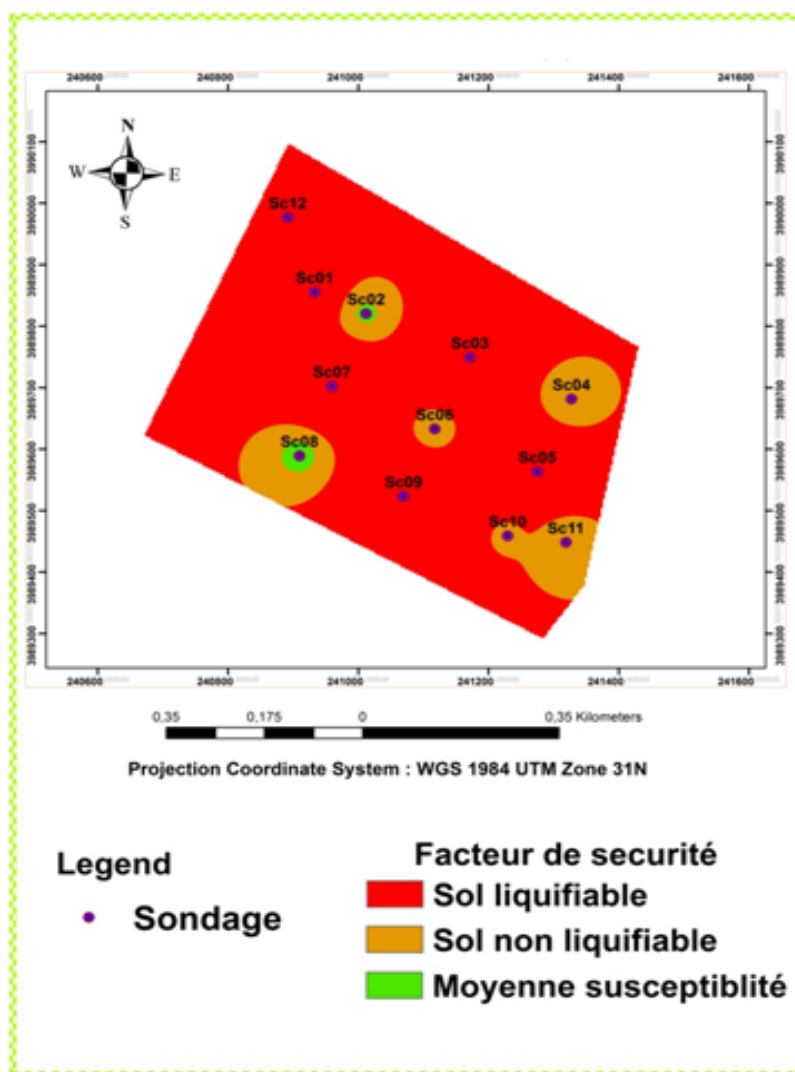


Figure 4. 3 Variation du coefficient de sécurité pour Z=3m

Les résultats montrent un risque important de liquéfaction sur toute la zone pour la profondeur de $Z=3\text{m}$ avec un coefficient de sécurité qui dépasse l'unité mettant la couche en instabilité dans cet endroit.

La même démarche a été effectuée pour les autres profondeurs. Les figures suivantes représentent la variation du coefficient de sécurité pour les profondeurs 6, 9, et 18 respectivement.

La figure 4.4 montre la distribution du coefficient de sécurité en surface pour une profondeur de 6 m.

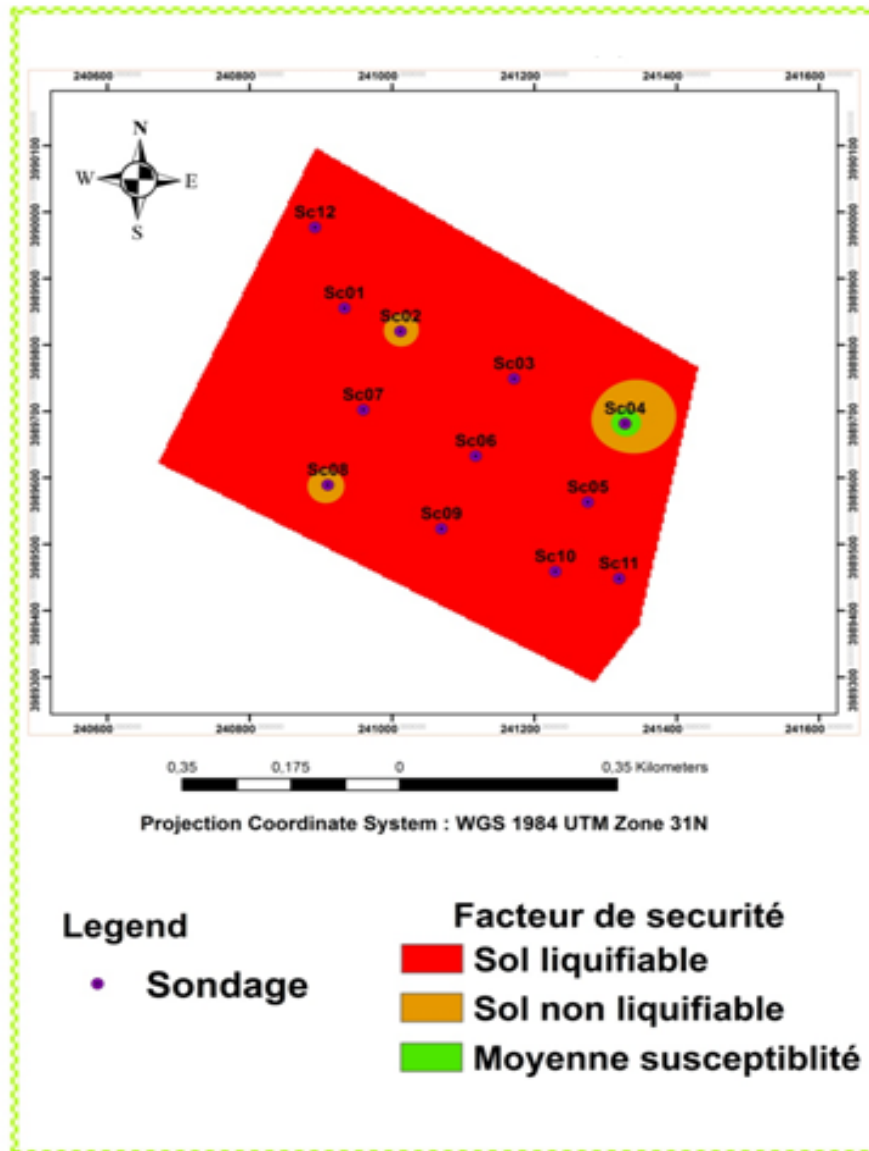


Figure 4. 4 Variation du coefficient de sécurité pour $Z = 6\text{ m}$

La figure 4.5 montre la distribution du coefficient de sécurité en surface pour une profondeur de 9 m.

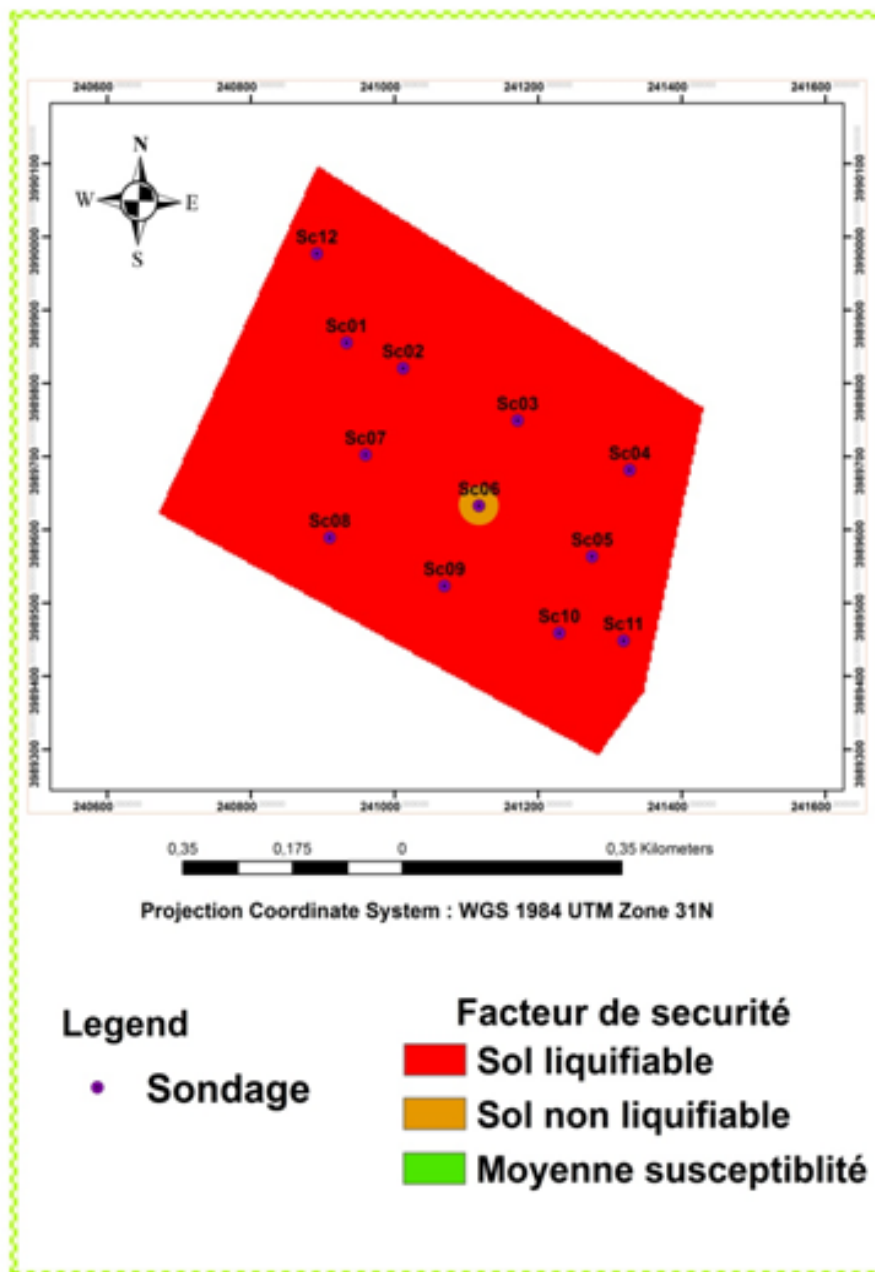


Figure 4. 5 Variation du coefficient de sécurité pour Z = 9 m

La figure 4.6 montre la distribution du coefficient de sécurité en surface pour une profondeur de 18 m.

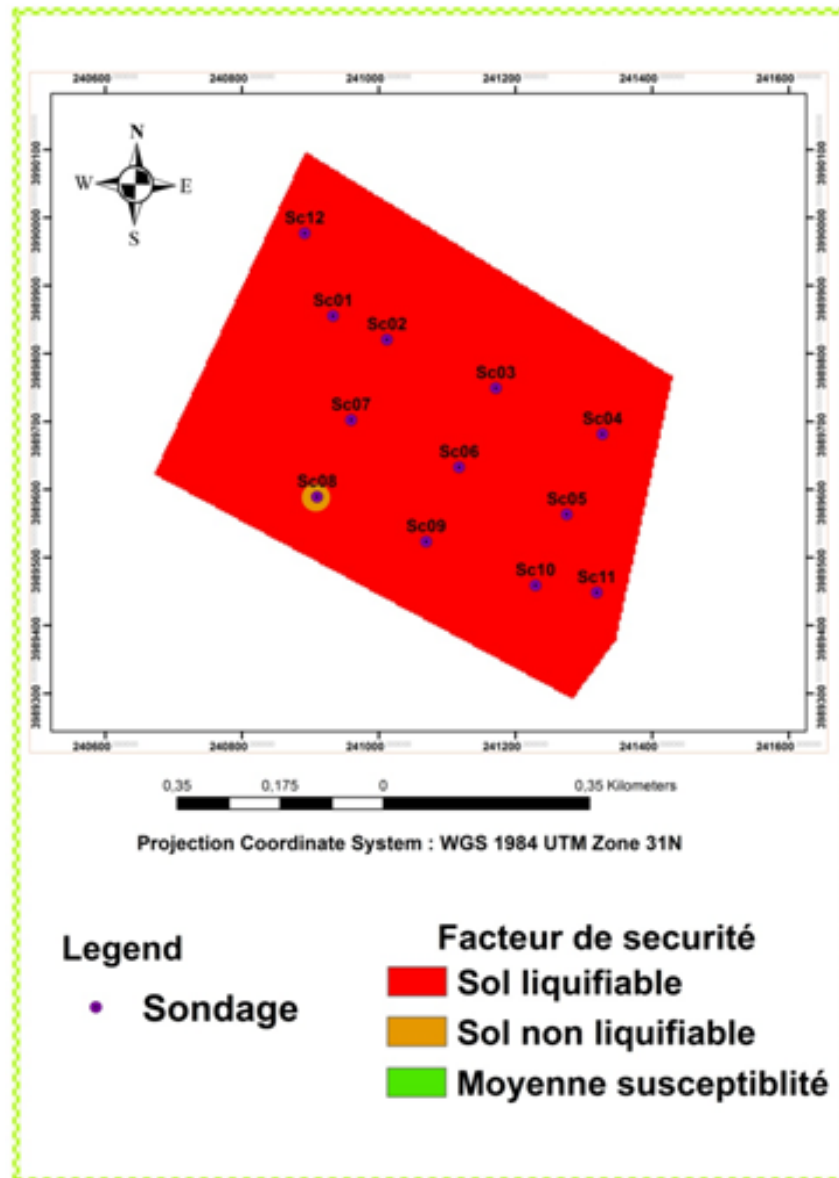


Figure 4. 6 Variation du coefficient de sécurité pour $Z = 18$ m

Les résultats montrent un risque important de liquéfaction sur toute la zone pour la profondeur de $Z=18$ m avec un coefficient de sécurité qui dépasse l'unité mettant la couche en instabilité dans cet endroit.

À travers les résultats obtenus dans notre étude du site de Mostaganem, on peut dire en général qu'il existe un risque de liquéfaction du sol dans les couches sableuses à une profondeur comprise entre 3 m et 18 m.

4.8 La probabilité de liquéfaction

La probabilité de liquéfaction pour chaque sondage est calculée par les relations[3.24] et[3.25], la probabilité moyenne du site est calculée par la relation[3.26].

La classification de la probabilité de liquéfaction est basée sur le tableau 3.1« proposé par (Juang et al, 2012) ».

Le tableau suivant représente la classification de la probabilité de liquéfaction pour chaque sondage.

Tableau 4. 15 La classification de la probabilité de liquéfaction pour chaque sondage

Sondages	PL	Classe	Description (Probabilité de liquéfaction)
01	36,290	3	Liquéfaction et non-liquéfaction également susceptible
02	27,140	2	liquéfaction peu probable
03	55,300	3	Liquéfaction et non-liquéfaction également susceptible
04	11,300	1	Presque certain que le sol ne sera pas liquéfié
05	0,000	1	Presque certain que le sol ne sera pas liquéfié
06	36,500	3	Liquéfaction et non-liquéfaction également susceptible
07	54,250	3	Liquéfaction et non-liquéfaction également susceptible
08	24,320	2	liquéfaction peu probable
09	49,240	3	Liquéfaction et non-liquéfaction également susceptible
10	29,900	2	liquéfaction peu probable
11	21,230	2	liquéfaction peu probable
12	41,060	3	Liquéfaction et non-liquéfaction également susceptible

La probabilité de liquéfaction moyenne pour tout le site, :

PL (%)	Classe	Description (Probabilité de liquéfaction)
30.72	2	liquéfaction peu probable

L'évaluation du potentiel de la liquéfaction du site étudié présente une liquéfaction peu probable de la classe 02.

La figure 4.7 montre la distribution du potentiel de la liquéfaction sur tout le terrain

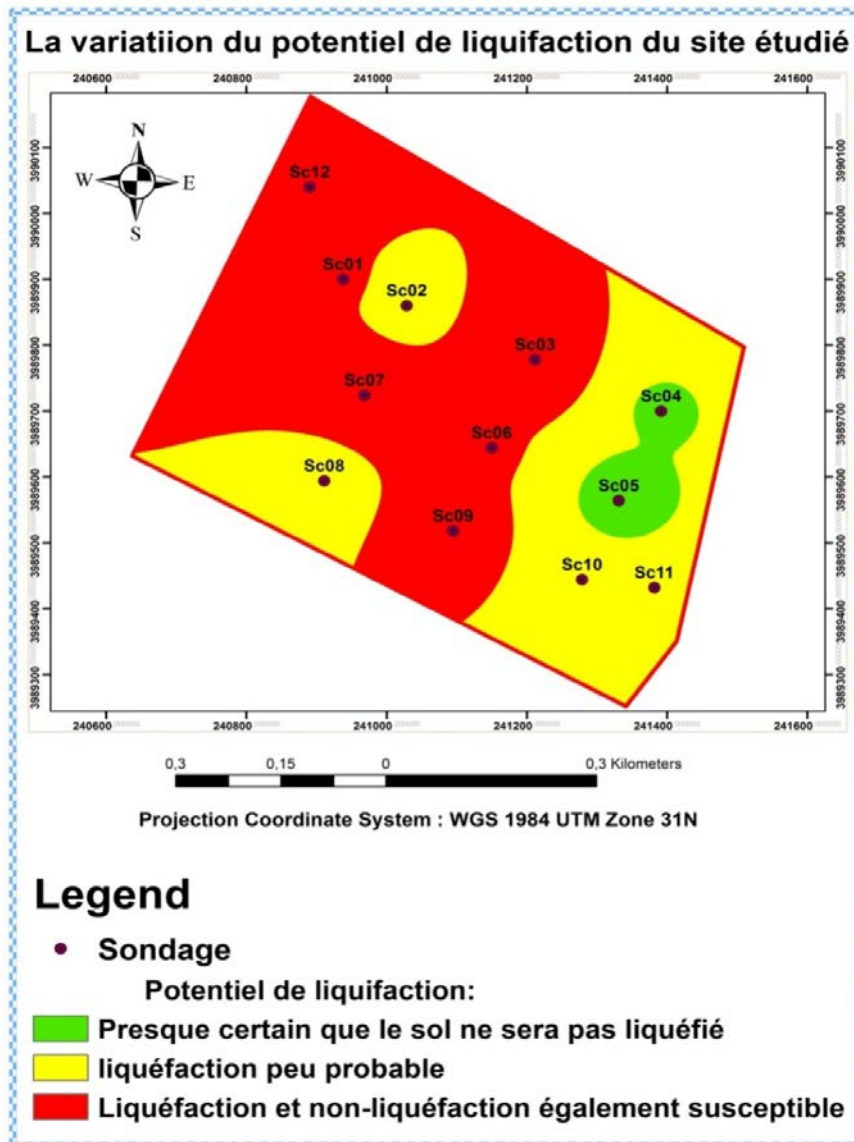


Figure 4. 7 La variation du potentiel de liquéfaction.

Les résultats montrent que le risque de liquéfaction et non liquéfaction est également susceptible sur tout le terrain.

4.9 Dispositions constructives

Le présent travail comporte les résultats finaux de l'étude de sol du terrain devant recevoir une centrale électrique de 1200 MW à Mostaganem. La campagne de reconnaissance par sondages carottés a permis de mettre en évidence un sol constitué d'une couche de recouvrement sableuse, peu silteuse, de couleur verdâtre à jaunâtre plus importante dans la direction Sud-Nord, des grés calcaires ponctuels beaucoup plus signalés dans la direction Sud surmontant un substratum marneux.

Les résistances de pointe obtenues sont irrégulières et faibles, mais, compte tenu de la nature pulvérulente du sol, de son degré de saturation et de la présence d'eau, ces résultats n'expliquent pas automatiquement une faiblesse de la portance du sol. Le mode de fondation que le **Laboratoire Central des Travaux Publics** a préconisé dans ce type de sol est :

- Fondation superficielle pour les ouvrages « légers » (R+0 à R+1), ancrées à partir de -1m50 de profondeur au minimum par rapport au niveau du terrain naturel actuel dans les formations de sable fin carbonaté de couleur jaunâtre à verdâtre, avec un taux de travail limité à 1.50 bars sans risque du tassement ou de rupture.
- Fondations profondes du type semelles ou radier sur pieux pour les autres ouvrages.

Les essais S.P.T ont révélé un sol moyennement dense à dense et liquéfiable.

Dans le cas des sols liquéfiable et suivant les résultats sur le site en considération, le tableau suivant présente quelques méthodes à adopter pour pallier aux problèmes de liquéfaction.

Tableau 4. 16 Méthode de mitigation des sites liquéfiables

Méthode	Principe	Type de sol approprié	Traitement
Virocompactage et vibroflottation	Densification par vibration et compactage du sable ou du gravier	Sols pulvérulents % fins <2 % (tamis 200)	>20 m
Compactage dynamique	Application répétée d'impacts mécaniques à la surface du sol	Sols pulvérulents	Généralement <10m
Injections solides	Densification et renforcement du sol par injection sous haute pression d'un coulis de ciment très visqueux ou d'un béton spécial	Tous les sols	>30m
Berne ou surcharge	Le remblai augmente la contrainte effective ainsi que la résistance au cisaillement du sol	Tous les sols	Dépendant des dimensions de la berme ou de la surcharge
Drains(Gravier, Sable, puits de pompage pour assèchement)	Augmentation de la perméabilité du sol en vue de réduire les surpressions interstitielles pour améliorer la résistance a la liquéfaction du sol	Sable, Silt et argile	Sable et gravier >30m(limités par l'équipement),drains préfabriqués >45m
Injections liquides	Injection de coulis(bentonite, ciment, gel, chaux) dans les pores de sols	Sable moyen a grossier, gravier	Très grande

Tenant compte de la nature de l'ouvrage projeté, de la capacité portante du sous-sol, de la nature des couches traversées et des risques de liquéfaction du sol analysé présente en certains endroits des risques de liquéfaction variant de moyens à très forts jusqu'à la profondeur de 18.0m, il serait judicieux de procéder à la mise en place des fondations sur pieux.

4.10 Conclusion

Le but de ce chapitre est de faire une analyse du potentiel de la liquéfaction à partir des données des essais In-situ

A travers les résultats obtenus dans notre étude du site de Mostaganem, on peut dire en général qu'il existe un risque de liquéfaction du sol dans les couches sableuses à une profondeur comprise entre 3 m et 18 m.

Vue l'importation du projet, une prise en compte du risque de liquéfaction est nécessaire, avec la prise en compte des différentes méthodes proposées dans la littérature.

Conclusion Générale

Conclusion générale

En tant qu'ingénieur géotechnicien prédire l'occurrence de phénomènes naturels et savoir gérer les risques est une chose primordiale et dont l'évaluation du risque doit être faite par plusieurs méthodes, nous nous sommes penchées sur la cartographie pour étudier ce risque.

La cartographie numérique des risques naturels, a pour objectif de fournir aux autorités locales des informations sur les aléas, les éléments exposés et de les soutenir dans leur prise de décision en matière de prévention pour l'aménagement, la préparation de la gestion de la crise et l'information de la population. C'est un outil indispensable à la gestion du risque ; en matérialisant des situations potentielles ; elle rend visible l'invisible.

Dans notre cas nous avons pu évaluer le risque de phénomène de liquéfaction à l'aide de la cartographie à partir des données des essais dans un site de la wilaya de Mostaganem.

A travers les résultats obtenus dans notre étude du site de Mostaganem, on peut dire qu'il existe un risque de liquéfaction du sol dans les couches sableuses à une profondeur comprise entre 3 m et 18 m.

L'objectif d'une telle démarche est avant tout de faire connaître aux individus l'existence de l'ensemble des risques sur leur lieu de vie, et ensuite de prendre toutes les dispositions nécessaires afin d'éviter tout risque.

Les sols admis susceptibles à la liquéfaction peuvent être améliorés en utilisant les différentes techniques disponibles (compactage dynamique, vibroflotation, colonnes ballastées... etc.)

Bibliographie

Bibliographie

- 1) Ali B. (2003). Séisme de Boumerdès 2003. «Analyse de la portance sismique et des potentiels de liquéfaction et de fluidisation des sols». Boumerdès, Algérie.
- 2) Abdeljalil Z. (2019) «Liquéfaction des sols sous chargement dynamique ». Cours Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- 3) Chogueur A. (2019/2020) « Essais in situ- le pénétromètre et ses variantes ». Thèse doctorat. Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- 4) Faïla B. (2005) « Cartographie de l'aléa dû aux mouvements de pente application à la commune de Bensekrane » Mémoire de fin d'études. Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- 5) Faïla B, Mohammed Amine A, Chérifa A. (2012) « Systémique et SIG: prévention contre l'aléa des mouvements de pentes: Cas de la commune de Bensekrane, Tlemcen (Algérie) » EUE.
- 6) Idriss, I. M, Boulanger, R.W. (2004) « Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes» Proceedings 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Stallion Press, Vol. 1, pp. 32–56.
- 7) IDRIS, I.M. An update to the Seed-Idriss.(1999) «Simplified procedure for evaluating liquefaction Potential.1999» Proceedings in, TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, Publication No.FHWARD-99-165, Federal Highway Administration, January.
- 8) IDRIS, I.M., and Boulanger, R.W. (2006) « Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes» J. Soil Dynamics and Earthquake Eng.26, 115–30.
- 9) Ishihara, K. (1985). «Stability of Natural Deposits During Earthquakes» Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco.
- 10) Juang, C. H, et al. 2002, “Assessing CPT-based methods for liquefaction evaluation with emphasis on the cases from the Chi-Chi, Taiwan earthquake”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22.3 (2002): 241-258.
- 11) Juang, C.H., Ching, J., Luo, Z., and Ku, C.K. (2012) «New models for probability of liquefaction using standard penetration tests based on an updated database of case histories» Article. Engineering Geology 133–134 85–93.
- 12) Mohamed. M, Ismail. B A. (10/11/2009) «Liquéfaction des sols : description, Méthodes d'évaluation, traitement, poste liquéfaction». Thèse Doctorat.

- 13)** Mohammed T. (2013) « Système d'Information Géographique ». Mémoire Master. Algérie.
- 14)** Quang hug Dang. (2019) « Comportement des sols sous liquéfaction artificielle, amélioration des sols a risque liquéfiabale ». Géotechnique, université paris-Est.
- 15)** Rapport d'étude géotechnique et géophysique. (2014) «Laboratoire Central des Travaux Public». Mostaganem, Algérie.
- 16)** Smain M, 2020 « Techniques Modernes en topographie et cartographie » Cours de topographie générale. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- 17)** Souad. B, Djawed. Z. (2016) «Assessing of liquefaction in Boumerdes (Algeria) using reliability analysis». Article.
- 18)** Yacine K, 2018 « Cours de système d'information géographique » Mémoire Master. Aménagement urbain, Université Larbi Ben M'hidi O.E.B., Algérie.