

*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*



*Faculté de la Construction
Département du Génie Civil*

Mémoire De Fin D'Etudes

Présenté par :

M^{elle} Khemirt Nouara

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière: Génie Civil

Spécialité: Géotechnique

Thème

**Analyse Mécano-Fiabiliste d'Un
Massif de Sol Sous Une Fondation**

Encadré par

Dr DEHMOUS Hocine

Co-encadreur **Mme RAHMANI Naima**

Promotion : 2021-2022

Remerciements

Je remercie tout d'abord dieu qui m'a aidé de terminer ce travail :

« Al hamdou lillah »

Je tiens à remercier mon encadreur Dr DEHMOUCE Houcine pour m'avoir proposé un sujet intéressant et pour la confiance qu'il m'a accordée. Il m'a dirigé tout au long de cette étude et m'a donné les grands axes de recherche. Je le remercie aussi pour sa disponibilité et sa gentillesse. Un grand merci aussi à Mme

REHMANI Naima pour son aide

Mes remerciements vont ensuite aux membres de jury : pour avoir accepté de présider le jury de mon mémoire.

Je remercie également tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation depuis mon premier cycle d'étude jusqu'à aujourd'hui.

Je tiens à remercier toute ma famille surtout Mon Père. Ma Mère dont la proximité, le soutien de tous les instants m'ont été une source d'énergie.

Enfin mes remerciements envers tous mes ami(e)

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, qui m'ont guidé et encouragé dans mes études jusqu'à atteindre ce stade de formation.

À tous ceux que j'aime.

Liste des figures

Figure I.1. Domaines de sûreté et de défaillance dans le cas de deux variables aléatoires $\{X\} = \{X1, X2\}$ (Selon Schneider, 1997).	7
Figure I.2. Domaine de défaillance, état limite et domaine de sécurité (Selon Lemaire, 2009).	8
Figure I.3. Schéma d'illustration de la méthode de Monte-Carlo (Selon Maynadier, 2003).	10
Figure I.4. Recherche de l'indice de fiabilité β et du point de conception P^* dans l'espace standard pour deux variables aléatoires $\{U\} = \{U1, U2\}$. (Selon Dehmous, 2007).	12
Figure II.5 : Schéma de la démarche pour une étude de risques (Selon Faber et Stewart, 2001).	15
Figure II.6 : Schéma du cadre général de la gestion du risque (Selon Faber et Stewart, 2001)	16
Figure II.7 : Hiérarchie des démarches Type de technique et niveau d'information (selon Kreuzer, 2000).	21
Figure II.8: Niveau de risque et ALARP (selon Faber et Stewart, 2001).	23
Figure II.9 : Exemple de diagramme F/N (Selon ANCOLD).	24
Figure III.10. Représentation schématique (Khennane, 2013).	27
Figure III.11: Types de fondations superficielles	28
Figure III.12: Courbe chargement-tassement d'une fondation superficielle	29
Figure III.13 : Fondation filante encastree	30

Figure III.14. Plan de travail MATLAB. (MADOUN et SOUIAH, 2021).	35
Figure III.15. Schéma Statique du Problème Etudié (Khennane, 2013).....	36
Figure III.16. Maillage avec l'élément triangulaire a trois-nœuds. (Khennane, 2013).	37
Figure III.17. Organigramme d'un logiciel éléments finis	38
Figure III.18: Répartition de la contrainte maximale dans le massif ??? (q= 50 KN/ m ²)	39
Figure III.19: Répartition de la contrainte maximale dans le massif (q=75KN/ m ²).....	40
Figure III.20: Répartition de la contrainte maximale dans le massif. (q=100KN/ m ²).....	40
Figure III.21: Répartition de la contrainte maximale dans le massif. (q=150KN/ m ²).....	41
Figure IV.22. Organigramme de calcul de la probabilité de défaillance d'un massif de sol sous une fondation avec la méthode de Monté Carlo.....	44
Figure V.23. Histogramme de la distribution de la charge q	48
Figure V.24. Histogramme de la distribution de la contrainte limite σ_{lim}	48
Figure V.25. Histogramme de la distribution de module d'élasticité E (Module de young)...	49
Figure V.26. Histogramme de la distribution de Coefficient de poisson ν	49
Figure V.27. Histogramme de la distribution de la contrainte maximale σ_{max}	50
Figure V.28. Courbe probabilité de défaillance - l'écart type.....	53
Figure V.29. Evolution de La probabilité de défaillance en fonction du coefficient de variation des deux variables aléatoires (q, σ_{lim}).	56

Liste des tableaux

Tableau I.1. Principales lois de distribution (Selon Schneider, 1997)	6
Tableau I.2. Correspondance entre l'indice de fiabilité β et la probabilité de défaillance (Selon Dehmous, 2007).	12
Tableau II.3 : Exemple de séquences d'une analyse de risques (Selon Fiber et Stewart, 2001).	16
Tableau II.4 : Sources des incertitudes cas d'un barrage (Kreuzer, 2000).	19
Tableau III.5. Différents type d'éléments utilisés dans MEF.(Amirat et Beloufa, 2021).	34
Tableau III.6. Effet de la variabilité de la charge q de la contrainte maximale σ_{max}	39
Tableau IV.7. Variables aléatoires et loi de distribution des paramètres	45
Tableau V.8. Variable aléatoire et loi de distribution du paramètre.	47
Tableau V.9. Effets de la variabilité du nombre de tirages sur la probabilité de défaillance.	51
Tableau V.10. Effets de la variabilité de l'écart type sur la probabilité de défaillance d'un massif de sol.	52
Tableau V.11. Effets de la valeur moyenne de la charge q sur la probabilité de défaillance.	53
Tableau V.12. Evolution de la probabilité de défaillance en fonction de la variabilité des deux paramètres (charge q + contrainte limite σ_{lim}).	55
Tableau V.13. Evolution de la probabilité de défaillance en fonction des quatre variables aléatoires ($q + \sigma_{lim} + E + v$)	57
Tableau V.14. Les valeurs de la contrainte maximale	58
Tableau V.15. Comparaison entre les solutions présentées avec plusieurs variables aléatoires	59

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les approches probabilistes et la fiabilité des structures

I.1. Introduction	2
I.2. Fiabilité d'une structure	3
I.3. Problématique	3
I.4. Choix des variables aléatoires de base	3
I.5. Lois de distribution	4
I.5.1. La loi normale (Laplace-Gauss)	5
I.5.2. La loi log normale	5
I.5.3. Loi de weibull. (Tebbi, 2005)	6
I.6. La fonction de performance	6
I.7. Indicateurs de fiabilité	9
I.8. Principales approches pour tenir compte des incertitudes	9
I.8.1 Méthode Monte Carlo	10
I.8.2. Méthodes approchées : FORM/SORM	11
I.9. Conclusion	13

Chapitre II : Analyse et Gestion des Risques

II.1. Introduction	14
II.2. Définition du risque	14
II.3. Cadre théorique de l'analyse des risques	15
II.3.1. Généralités	15
II.3.2. Structure de l'analyse des risques	16
II.3.3. Définition du cadre de l'analyse des risques	17
II.3.4. Analyse du risque	17

II.3.5. Estimation du risque	19
II.3.6. Évaluation du risque	21
II.3.6.1. Calcul du risque	21
II.3.6.2. Acceptation du risque	21
II.3.6.3. Prise de décision.....	25
II.3.7. Contrôle du risque	25
II.3.7.1. Traitement des risques	25
II.3.7.2. Surveillance et suivi	26
II.4. Conclusion	26

Chapitre III : Analyse déterministe d'un problème géotechnique

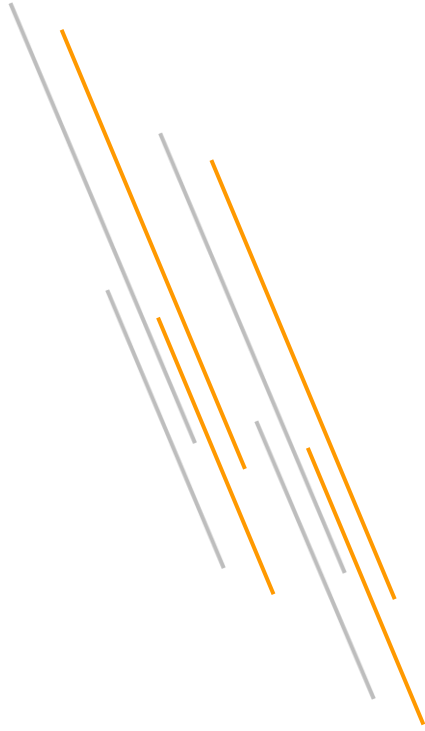
III.1 Introduction	27
III.2. Géométrie du problème	27
III.3. Rappel théorique	28
III.3.1. Introduction	28
III.3.2. Capacité portante et tassement	29
III.3.3. Méthodes de calcul de la capacité portante d'une fondation superficielle.....	30
III.4. Méthode d'analyse par éléments finis	31
III.4.1. Introduction	31
III.4.2. LES AVANTAGES DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS	31
III.4.3. Concepts de base	32
III.4.4. Les éléments pour l'analyse par éléments finis	33
III.4.5. Présentation de l'outil numérique : logiciel MATLAB.....	34
III.4.6. Exemple de problème plan (bidimensionnel).....	36
III.4.6.1. Discrétisation géométrique.....	36
III.4.6.2. Organigramme d'un logiciel éléments finis MATLAB	37
III.4.6.3. Résultats du calcul : Contraintes plans	39
III.5. Conclusion	41

Chapitre IV: Analyse Fiabiliste D'un Massif d'un Sol Sous Une Fondation

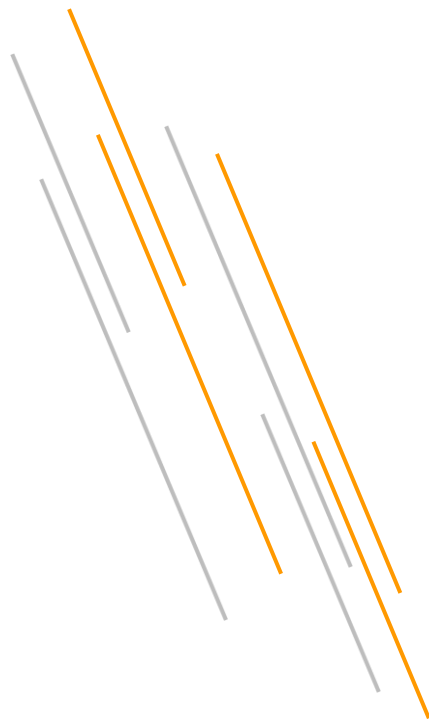
III.1. Introduction	42
III.2. Analyse probabiliste	42
III.2.1 Définition de la simulation probabiliste.....	42
III.3. Estimation de la probabilité de défaillance.....	43
III.4. Génération de nombres aléatoires	43
III.5. Organigramme de calcul	43
III.6. Choix des variables aléatoires	44
III.7. Choix de la fonction d'état limite.....	45
III.8. Conclusion.....	46

Chapitre V : Résultats de l'analyse fiabiliste

IV.1. Introduction.....	47
IV.2. Variabilité des paramètres aléatoires	47
IV.2.1. Paramètres d'entrée.....	47
IV.2.2. Paramètre de sortie.....	50
IV.3. Estimation de la probabilité de défaillance du massif de sol	50
IV.3.1. Etude de la probabilité de défaillance de notre massif du sol avec la charge comme variable aléatoire	50
IV.3.1.1. Effets du nombre de tirages sur la probabilité de défaillance	51
IV.3.1.2. Effets de l'écart type sur la probabilité de défaillance	51
IV.3.1.3. Effets de la moyenne du paramètre (q) sur la probabilité de défaillance	53
IV.3.2. Etude de la probabilité de défaillance de notre massif de sol avec deux variables aléatoires : charge et contrainte limite du sol	54
V.3.2.1 Effets de la variabilité des deux paramètres	54
V.3.3. Effets de la moyenne des 4 paramètres (q, σ_{lim} , E, v) sur la probabilité de défaillance .	56
V.5. Comparaison entre les solutions présentées avec plusieurs variables aléatoires	58
IV.6. Conclusion	59



INTRODUCTION GÉNÉRALE



Introduction Générale

Dans notre société moderne, la probabilité de rencontrer une défaillance dans les différents types de structure est en fonction de la fiabilité des mesures de sécurité adoptées. Mais en rendant la complexité des calculs une chose du passé, car l'ordinateur a révolutionné les sciences de l'ingénieur, des problèmes considérés impossibles avec les méthodes classiques, sont maintenant facilement accessibles avec les méthodes numériques, une de ces méthodes est l'analyse par éléments finis.

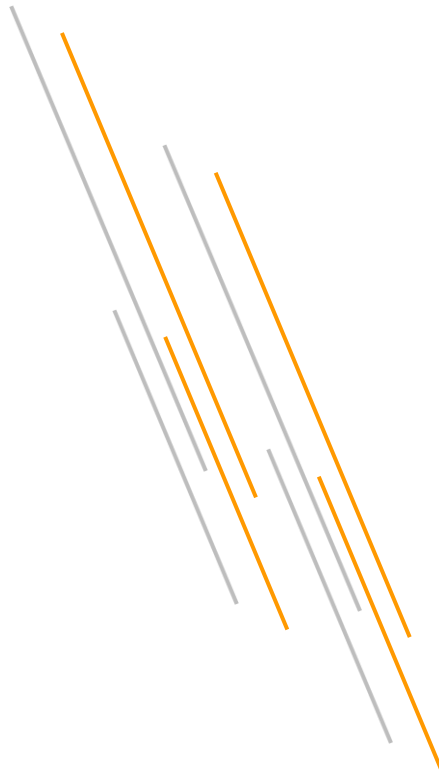
La démarche proposée dans ce mémoire consiste en un couplage mécano-fiabiliste appliqué à l'analyse d'un problème de géotechnique.

Une étude numérique a été effectuée dans ce mémoire en utilisant un code élément fini avec un script MATLAB pour l'étude d'un massif de sol sous une fondation.

Le plan de travail suivi est comme suit :

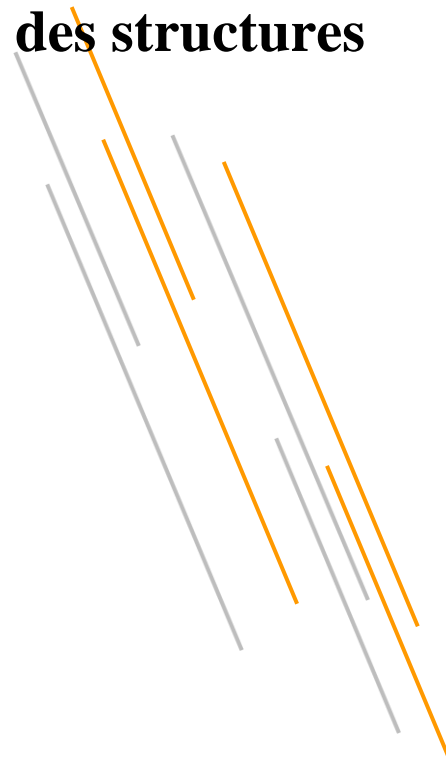
- Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités de l'approche probabiliste et la fiabilité des structures.
- Le deuxième chapitre présente l'analyse et la gestion des risques.
- Dans le troisième chapitre, on s'intéresse à un calcul déterministe par un modèle d'éléments finis
- Le quatrième chapitre : présente les principes méthodes d'Analyse Fiabiliste de notre massif de Sol sous une Fondation
- Dans le cinquième chapitre, on présente différents résultats de l'approche probabiliste tels que l'influence des paramètres considérés aléatoire sur les résultats de la probabilité de défaillance.

Enfin, une conclusion générale est proposée à la fin du document.



CHAPITRE I

Généralités sur les approches probabilistes et la fiabilité des structures



I.1. Introduction

La variabilité des propriétés du sol et les différentes techniques d'essais sont en général des sources d'incertitude dans le domaine de la géotechnique. Les ingénieurs considèrent ces problèmes en utilisant des analyses déterministes, basées sur la notion classique du facteur de sécurité. Cependant, l'expérience pratique montre que l'approche déterministe donne des solutions conservatives sans prendre en compte l'incertitude ; ainsi, la fiabilité d'un système ne peut pas être correctement évaluée.

Par conséquent, une évaluation rigoureuse de l'incertitude liée aux problèmes géotechniques nécessite certainement l'application de la méthode probabiliste en complément des analyses déterministes classiques.

La mécanique probabiliste est un domaine de fiabilité qui permet d'une part de tenir compte des incertitudes concernant un système physique. D'autre part elle permet d'étudier l'impact de ces incertitudes sur la réponse du modèle qui représente le système étudié. D'un point de vue scientifique, ce domaine est apparu au cours des années 70 dans des études de génie civil bien que les premières contributions soient apparues au cours de la première partie

du 20^{ème} siècle (**Lévi, 1949**).

La mécanique probabiliste correspond à un couplage entre :

- D'une part, la modélisation d'un phénomène physique (Ex. génie civil, génie mécanique, etc.)
- D'autre part, les mathématiques appliquées (Ex : statistiques, théorie des probabilités et simulation numérique).

I.2. Fiabilité d'une structure

La fiabilité d'une structure se caractérise par la performance de celle-ci à remplir une fonction définie :

- Sous des conditions données.
- Pendant une durée fixée.
- Et en respectant le niveau de sécurité exigé.

La difficulté dans l'évaluation de la fiabilité provient de la nature incertaine, des phénomènes mis en jeu sur la structure considérée (variabilités des propriétés des matériaux, imprécisions géométriques, aléas des chargements appliqués,...). Malgré cela, on en tient compte, car ces phénomènes vont avoir un impact significatif sur les performances du système. (**Ditlevsen et al., 1996 ; Lemaire, 2009**).

I.3.Problématique

Traditionnellement, le dimensionnement des structures est fondé sur une démarche déterministe dans laquelle l'ensemble des paramètres, ci-dessus précités, prennent une valeur fixe. Précisément, les paramètres incertains sont décrits par une valeur caractéristique défavorable. Associée à des coefficients de sécurité, l'analyse conduit alors à une réponse binaire (“sûreté” ou “défaillance”) vis-à-vis d'un critère donné, qui traduit d'une certaine manière la confiance que l'on peut accorder à ce dimensionnement précis.

- L'approche déterministe utilise par conséquent une marge volontairement pessimiste conduisant le plus souvent à un surdimensionnement injustifié.
- Dans la démarche fiabiliste en revanche, on construit une modélisation probabiliste dans laquelle, les données incertaines sont représentées par des variables aléatoires. On peut ensuite évaluer la probabilité de défaillance de la structure ainsi que mesurer la sensibilité de cette probabilité par rapport à chacune des variables aléatoires introduites.

Deux applications sont envisageables. Soit on :

- Connaît les caractéristiques de la structure et on vérifie que sa fiabilité est satisfaisante,
- Optimise le dimensionnement de celle-ci de façon à respecter un niveau de fiabilité donné.

Par un traitement plus rationnel des incertitudes, l'approche fiabiliste permet donc une meilleure appréciation des marges de sécurité à l'aide d'indicateurs de confiance objectifs et constitue en ce sens un outil adéquat pour l'aide à la décision en phases de conception et de maintenance.

L'analyse fiabiliste se fait suivant les trois étapes suivantes :

- La sélection des variables aléatoires de base, qui vont intégrer les incertitudes mises en jeu à travers leur loi de distribution
- Le choix d'une fonction de performance définissant la défaillance du système
- Le calcul des indicateurs de fiabilité qui vont fournir une évaluation quantitative et qualitative de la fiabilité de celui-ci (**Ameddah, 2015**).

I.4. Choix des variables aléatoires de base

Une variable aléatoire donc est une fonction mathématique d'une expérience aléatoire.

La sélection des variables aléatoires est une étape cruciale pour le modèle fiabiliste qui nécessite :

- Une connaissance fine du matériau étudié (origine, comportement mécanique) et de la structure considérée (fabrication, actions).

Les enjeux, à ce stade, sont de :

- Préciser les paramètres incertains (appelés variables aléatoires de base ou variables de conception pouvant jouer un rôle significatif sur la fiabilité de la structure.
- Quantifier la variabilité de ces paramètres.

Ces incertitudes proviennent le plus souvent, de variabilités liées :

- Au processus de fabrication.
- Aux imperfections des conditions d'essais de caractérisation.
- À des facteurs incontrôlés tels que les fluctuations du chargement ou simplement de la difficulté d'accéder à certaines données ou informations.

Ainsi le choix des variables aléatoires est guidé par plusieurs critères :

- L'objectif de l'étude fiabiliste.
 - Par exemple, l'utilisation des propriétés mécaniques suffira à évaluer la probabilité de défaillance d'un matériau donné
 - En revanche, pour la conception d'un nouveau matériau, le recours à des données supplémentaires sera plus pertinent.
 - L'explication physique des aspects du comportement mécanique du matériau. C'est notamment le mode de défaillance et les causes de sa mise en place suivant la sollicitation envisagée.
 - La disponibilité de résultats expérimentaux. En effet, les modèles probabilistes associés aux variables aléatoires doivent effectivement être physiquement justifiés pour aboutir à une représentation réaliste.
- (Dehmous, 2007).

I.5. Loïs de distribution

Ils existent, dans la littérature, plusieurs types de lois de distribution décrivant les variables aléatoires.

Les plus utilisées pour décrire les incertitudes en génie civil sont :

- Loi normale.
- Loi log normale.
- Loi de Weibull.

I.5.1. La loi normale (Laplace-Gauss)

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes.

En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie de dispositifs en fin de vie (usure) car le taux de défaillance est toujours croissant. On ne l'utilisera que si la moyenne des durées de vie est supérieure à 3 fois l'écart type. En effet, t est toujours positif, alors que la variable normale est définie de $-\infty$ à $+\infty$; la restriction imposée réduit la probabilité théorique de trouver une durée de vie négative à environ 0.1 %

(Tebbi, 2005)

Selon **Dehmous H**, Une variable aléatoire X obéit à une loi normale si et seulement si sa fonction de densité de probabilité est telle que :

$$\forall x \in \mathbb{R}, \quad f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right]$$

Avec : μ_X la moyenne

σ_X l'écart-type de X

La fonction de répartition s'écrit quant à elle comme suit :

$$\forall x \in \mathbb{R}, \quad F_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right] du$$

I.5.2. La loi log normale

Elle apparaît dans les phénomènes issus du produit d'une multitude de facteurs. Elle est très utilisée dans la modélisation de données hydrologiques, mais également dans la construction de modèle liant l'amplitude des séismes avec leurs intervalles d'occurrence. Elle est parfois utilisée par défaut, pour représenter les caractéristiques physiques des matériaux et certaines sollicitations permanentes ne changeant pas de signe.

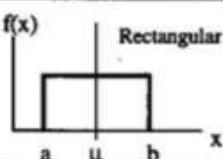
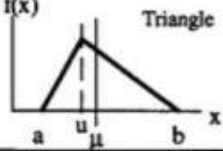
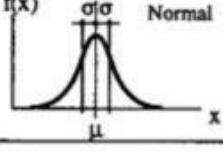
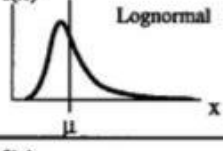
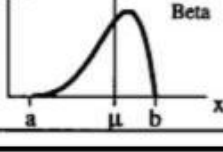
Une variable aléatoire X suit une loi log normale si et seulement si la variable $Y = \ln X$ obéit elle-même à une loi normale (X étant définie sur $]0, +\infty [$). (**AKLI et RIHANE, 2017**).

I.5.3. Loi de weibull. (Tebbi, 2005)

C'est la plus populaire des lois, utilisée dans plusieurs domaines (électronique, mécanique,...). Elle permet de modéliser en particulier de nombreuses situations d'usure de matériel. Elle caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement. Dans sa forme la plus générale.

Toutes ces caractéristiques, de ces lois, sont représentées dans le tableau ci-dessous. (Selon Schneider, 1997).

Tableau I.1. Principales lois de distribution (Selon Schneider, 1997).

 <p>Rectangular</p>	$-\infty < a < b < +\infty$ $\mu = \frac{a+b}{2}$ $\sigma = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$	$a \leq x \leq b$ $f(x) = \frac{1}{b-a}$ $F(x) = \frac{x-a}{b-a}$	
 <p>Triangle</p>	$-\infty < a < b < +\infty$ $\mu = \frac{1}{3}(a+b+u)$ $\sigma = \sqrt{\frac{1}{18}(a^2+b^2+u^2-ab-au-bu)}$	$a \leq x \leq u$ $f(x) = \frac{2}{b-a} \left(\frac{x-a}{u-a} \right)$ $F(x) = \frac{x^2 - 2ax + a^2}{(b-a)(u-a)}$	$u \leq x \leq b$ $f(x) = \frac{2}{b-a} \left(\frac{b-x}{b-u} \right)$ $F(x) = 1 - \frac{x^2 - 2bx + b^2}{(b-a)(b-u)}$
 <p>Normal</p>	$-\infty < \mu < +\infty$ $\sigma > 0$ μ σ	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$ $F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) dx$	
 <p>Lognormal</p>	λ, ζ $\mu = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right)$ $\sigma = \mu \sqrt{\exp(\zeta^2) - 1}$	$f(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right)$ $F(x) = \int_0^x \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right) dx$	
 <p>Beta</p>	$-\infty < a < b < +\infty$ $r, s \geq 1$ $\mu = a + (b-a) \cdot \frac{r}{r+s}$ $\sigma = \frac{b-a}{r+s} \sqrt{\frac{rs}{r+s+1}}$	$f(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r)\Gamma(s)} \cdot \frac{(x-a)^{r-1}(b-x)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}}$ $F(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r)\Gamma(s)} \int_a^x \frac{(u-a)^{r-1}(b-u)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}} du$	

I.6. La fonction de performance

Il s'agit dans cette partie de construire un scénario de défaillance de la structure, autrement dit : préciser l'état limite au-delà duquel cette structure n'est plus considérée comme fiable. Ces états limites correspondent principalement à des exigences en termes de tenue mécanique (la défaillance est associée à la rupture du matériau ou la ruine de la structure) ou d'aptitude au service (la défaillance est associée à des déformations ou un endommagement excessif) (Lyonnet, 2006).

La notion de fiabilité étant posée, un critère de défaillance est défini à l'aide d'une fonction dite de performance (ou d'état limite), notée G , et qui dépend des variables aléatoires du modèle. Par convention, on définit le domaine de sûreté D_s et le domaine de défaillance D_f de \mathbb{R}^k comme suit :

Dans le cas des études fiabilistes, on introduit généralement plus d'un paramètre aléatoire,

k étant l'ensemble des variables de X_i , du problème constitue dans ce cas un vecteur

$$\{X\} = \{X\}_{i=1..k} \text{ de } \mathbb{R}^k$$

$$D_s = \{ \{X\} \in \mathbb{R}^k, G(\{X\}) > 0 \}$$

$$D_f = \{ \{X\} \in \mathbb{R}^k, G(\{X\}) \leq 0 \}$$

Où :

\mathbb{R}^k est l'ensemble des k variables

La frontière $\{ \{X\} \in \mathbb{R}^k, G\{X\} = 0 \}$ est la surface d'état limite.

La Figure I.4, ci-dessous, présente cette définition dans le cas de deux variables aléatoires de base.

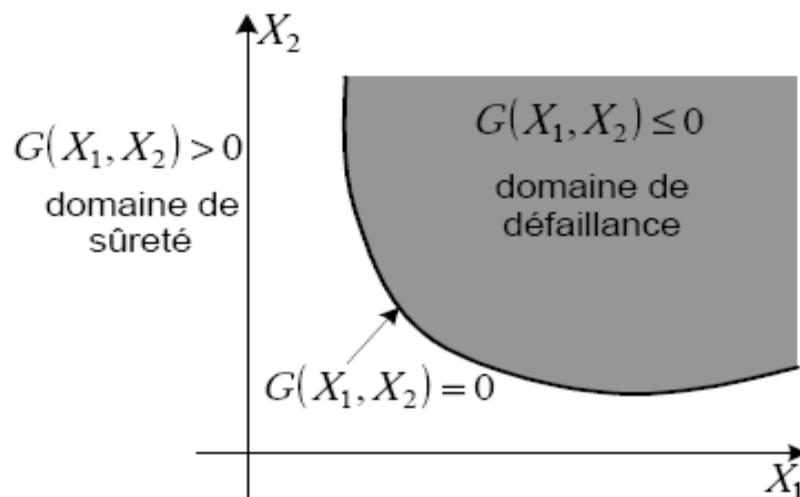


Figure I.1. Domaines de sûreté et de défaillance dans le cas de deux variables aléatoires $\{X\} = \{X_1, X_2\}$ (Selon Schneider, 1997).

Les points essentiels concernant le critère de défaillance sont les suivants :

- Le choix de la fonction de performance se doit d'être dicté par la cause physique de la défaillance de façon à en obtenir une représentation réaliste.
- La fonction d'état limite $G(\{X\})$ peut s'écrire sous la forme suivante (Lemaire, 2005) :

$$G\{X\} = R\{X\} - S\{X\}$$

Avec : R : une résistance de la structure

Et : S : une donnée relative à la sollicitation appliquée.

La fonction G n'est pas forcément une fonction explicite des variables de base.

Elle peut dépendre de la réponse de la structure (par exemple contraintes ou déformations).

Son évaluation nécessite alors un calcul mécanique préalable (le plus souvent par éléments finis) faisant intervenir une loi de comportement (couplage mécano-fiabiliste).

Il faut noter que :

- Une valeur **positive de G** signifie que les réalisations des variables aléatoires conduisent à **une situation de sécurité**.
- Une valeur **négative** signifie qu'elles conduisent à **une situation de défaillance**.
- La courbe représentant $G = 0$ est appelée courbe d'état limite et que lorsque :
 - $G(R, S) < 0$: nous sommes dans le domaine de défaillance,
 - $G(R, S) > 0$: nous sommes dans le domaine de sécurité,
 - $G(R, S) = 0$: nous sommes entre les 2 domaines soit dans un état limite.

(GUEDRI, 2018).

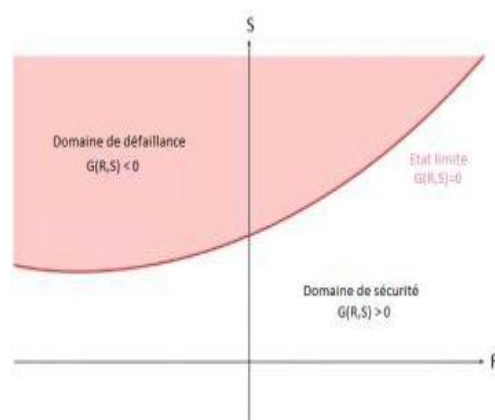


Figure I.2. Domaine de défaillance, état limite et domaine de sécurité (Selon Lemaire, 2009).

I.7. Indicateurs de fiabilité

La fiabilité Re (en anglais, reliability) d'une structure est conventionnellement définie de la façon suivante :

$$Re = 1 - Pf$$

Où

Pf : probabilité de défaillance (probability of failure) correspond à la probabilité d'avoir une valeur négative d'une réalisation de la fonction d'état G .

On a donc :

$$P_f = P (G\{\mathbf{X}\} \leq 0)$$

La fiabilité Re qui est donc un indicateur, de confiance, constitue le résultat essentiel d'un calcul fiabiliste.

Si on introduit, la densité de probabilité conjointe $f\{\mathbf{X}\}$ des variables aléatoires $\{\mathbf{X}\}$ du modèle, la probabilité de défaillance s'écrit alors comme suit :

$$P_f = \int_{D_f} f\{\mathbf{X}\}(\{x\}) \prod_{i=1}^k dx_i$$

Selon Dehmous. H, il est très rare que cette intégrale puisse être étudiée analytiquement voire numériquement. Dans la pratique, on ne dispose pas généralement de la densité de probabilité conjointe du vecteur. Aussi, on doit se contenter le plus souvent des lois marginales relatives à chaque variable et à certaines informations sur leur corrélation. De plus, le domaine d'intégration peut être défini de façon implicite et complexe selon le modèle mécaniqueretenu.

Diverses méthodes de résolution ont ainsi été développées pour pallier ces difficultés (Madsen et al., 1986). Classiquement, on distingue deux grandes familles de méthodes :

- Les méthodes basées sur des simulations,
- Les méthodes recourant à une approximation.

I.8. Principales approches pour tenir compte des incertitudes

Au nombre des méthodes, de résolution de l'incertitude, disponibles dans la littérature, nous avons choisi d'en présenter deux grandes familles d'approche qui nous paraissent les plus répandues dans le calcul de la fiabilité (Lemaire, 2005). Ce sont les méthodes suivantes :

- Méthodes à base de simulations : **Simulation de monte Carlo**
- Méthodes approchées : **Form/Sorm**

I.8.1 Méthode Monte Carlo

La méthode de simulation de Monte Carlo (MC) est une procédure simple qui est compatible pour l'analyse numérique et convient aux problèmes trop compliqués à résoudre analytiquement. Cette méthode considère toutes les différentes possibilités en combinant toutes les combinaisons possibles des variables aléatoires.

Selon Dehmous. H, il s'agit de la technique la plus ancienne et la plus intuitive d'évaluation de la probabilité de défaillance. Basée sur l'application de la loi des grands nombres, elle consiste à déterminer un estimateur de P_f par succession de tirages aléatoires indépendants.

On réalise ainsi un nombre N_t important de tirages des variables aléatoires en accord avec leur loi de distribution conjointe (si elle existe) ou en accord avec la loi marginale de chaque variable et avec leurs éventuelles corrélations.

Pour chaque tirage, la fonction de performance est calculée et l'on dénombre les tirages $N_{t,f}$ conduisant à la réalisation $G(\{X\}) \leq 0$ (**figure I.6**).

On en déduit alors la probabilité de défaillance par un traitement statistique direct :

$$P_f = \frac{N_{t,f}}{N_t}$$

Avec : N_t est le nombre de tirages des variables aléatoires

$N_{t,f}$ est le nombre de tirages dénombrés

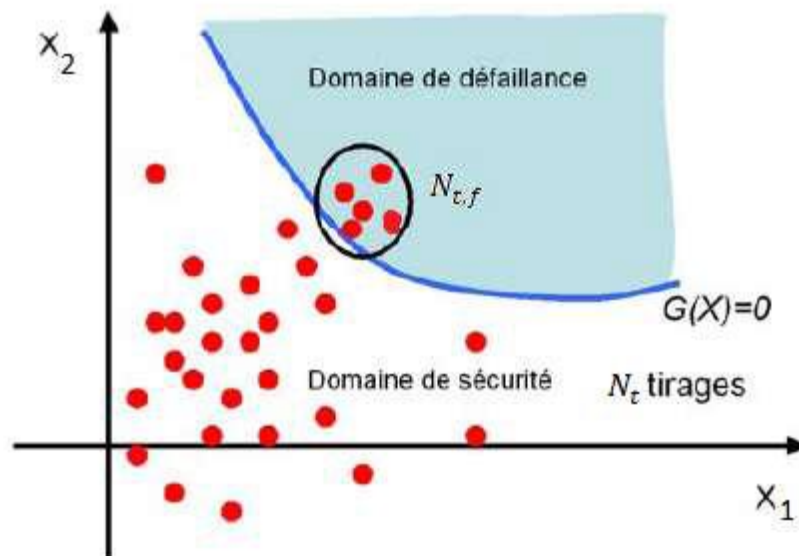


Figure I.3. Schéma d'illustration de la méthode de Monte-Carlo (Selon Maynadier, 2003).

• Cette méthode présente avant tout l'avantage d'une simplicité de mise en œuvre et d'une absence d'exigences mathématiques spécifiques pour la fonction $G(X)$.

• En revanche, une attention particulière doit être portée à la :

○ Stabilité de la valeur de P_f et ce quel que soit le nombre de tirage N_t . Pour des valeurs de P_f de l'ordre de 10^{-k} avec $k \geq 5$, il est nécessaire de réaliser un minimum de N_t pour assurer cette stabilité. Pour l'assurer, il faut $N_{t,\min} = 10^{k+2}$ simulations de tirages. Par ailleurs,

Il faut veiller également à l'indépendance de la probabilité d'une éventuelle défaillance vis-à-vis de la génération de l'échantillonnage en effectuant pour cela des mesures de P_f pour un nombre de tirages croissant allant de N_t jusqu'à t_{\min} .

○ Convergence des résultats obtenus,

• Outre la difficulté de satisfaire à ces deux exigences dans le cas de faibles probabilités de défaillance, le temps de calcul induit dans cette méthode peut s'avérer conséquent et parfois difficilement conciliable avec une analyse par éléments finis. (GUEDRI, 2018).

I.8.2. Méthodes approchées : FORM/SORM

La seconde famille, dites Méthodes approchées, regroupe les méthodes d'approximations,

essentiellement utilisées en fiabilité des structures (Madsen et al., 1986).

Dans ce cadre, les méthodes les plus répandues sont les suivantes :

- La **Form** (First Order Reliability Method),
- La **Sorm** (Second Order Reliability Method).

Ces méthodes sont basées sur la détermination de l'indice de fiabilité β . Celui-ci est la distance la plus courte entre l'origine 0 du repère et un point P situé sur la surface d'état limite. Ce point P doit être celui où la zone de défaillance possède la plus grande probabilité d'occurrence (Figure I.7). Ces deux paramètres permettent ensuite d'accéder à une valeur approchée de la probabilité de défaillance.

Il faut savoir que plusieurs définitions sont possibles pour β mais celle préconisée, par Hasofer et Lind (Lemaire, 2009), est aujourd'hui la plus largement employée compte tenu de son invariance vis-à-vis de la représentation de la fonction de performance.

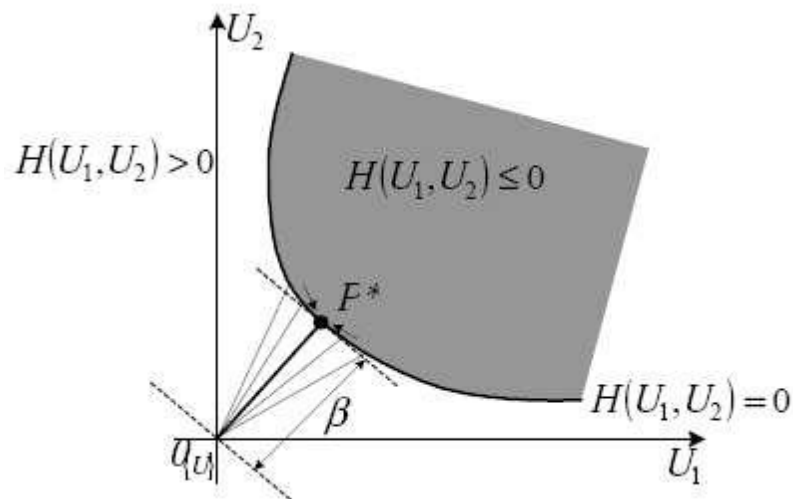


Figure I.4. Recherche de l'indice de fiabilité β et du point de conception P^* dans l'espace standard pour deux variables aléatoires $\{U\} = \{U_1, U_2\}$. (Selon Dehmous, 2007).

Le tableau I.2. Ci-dessous, montre quelques valeurs de la probabilité de défaillance pour des indices de fiabilité allant de 0 à 6 :

Tableau I.2. Correspondance entre l'indice de fiabilité β et la probabilité de défaillance (Selon Dehmous, 2007).

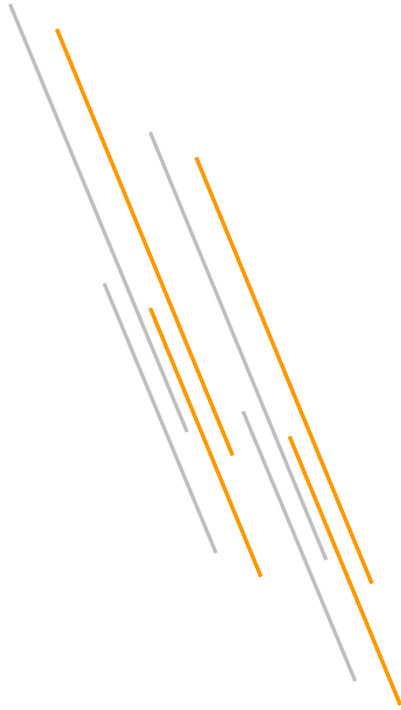
β	P_f
0	0.5
1	0.16
2	2.28×10^{-2}
3	1.35×10^{-3}
4	3.17×10^{-5}
5	2.87×10^{-7}
6	9.87×10^{-10}

Ce tableau montre ainsi que plus la valeur de β est grande, plus la fiabilité de la structure est importante (étant admis que l'origine de l'espace standard appartient au domaine de sûreté).

I.9. Conclusion

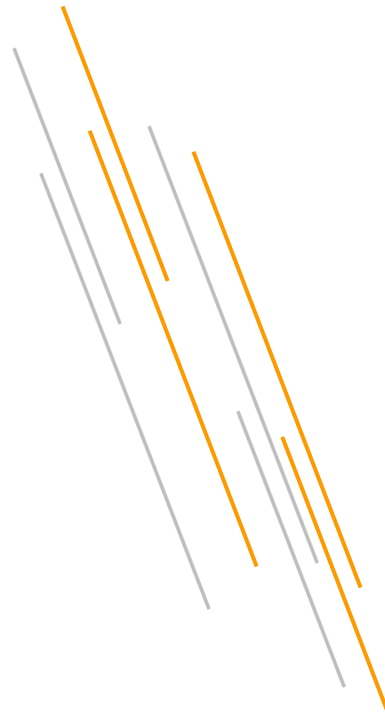
L'approche probabiliste (fiabiliste) en géotechnique est souvent mise en œuvre dans le cadre des contrôles de qualité. Ceux-ci permettent d'observer la dispersion de telle ou telle quantité, et de suivre leur variabilité. Les statistiques sont l'outil essentiel et les modélisations par variables aléatoires s'appuient sur un retour d'expérience. Il est à noter aussi, que les méthodes probabilistes fondées sur une certaine connaissance statistique dont l'évaluation des probabilités pouvait apporter une précision supplémentaire qui se révèle, utile dans plusieurs champs disciplinaires et techniques.

Le calcul déterministe et la compréhension de l'analyse fiabiliste de notre structure fera l'objet des chapitres qui suivent.



CHAPITRE II

Analyse et Gestion des Risques



II.1. Introduction

Les études de risques sont devenues, au même titre que les études d'impact, juridiquement obligatoire dans de nombreux pays dont le notre et touche tous les domaines d'activité. Une analyse de risque peut être conduite à tous les stades du projet (conception, projet détaillé), de la conception, à l'exploitation d'un ouvrage en passant par sa construction.

II.2. Définition du risque

Le risque représente la mesure de la probabilité d'occurrence et de la gravité d'un évènement présentant un danger pour la vie humaine, les biens, l'environnement. Le risque R_i peut être exprimé par le produit de la probabilité d'occurrence P d'un évènement par la mesure de l'ampleur des conséquences C (mise en danger de vies humaines, pertes sociales, économiques, et environnementales, dégâts). Soit : $R_i = P \times C$

Cette relation peut aussi s'écrire : $R_i = P \times C \alpha$

Où α peut être égale à 1 ou supérieur si l'on pense judicieux d'augmenter le risque dans le cas où l'évènement peut avoir des conséquences particulièrement graves. Le risque total d'un système correspond à la somme de tous les risques individuels en relation avec les causes primaires (évènements initiateurs). Il faut relever que différents concepts ont été proposés pour caractériser le risque. A titre d'exemple, en associant le risque à des conditions de charges particulières (tels que les crues, séisme, ou statique), le risque peut être exprimé par : $Risque = p_1 \times p_2 \times conséquences$

Avec

p_1 : Probabilité d'occurrence de l'évènement initiateur,

p_2 : Probabilité de rupture si l'évènement initiateur se produit.

Dans le cadre de la gestion du risque, ne pouvant pas intervenir pour modifier la probabilité d'occurrence d'un évènement naturel, il faut chercher à réduire :

- D'une part, les chances d'occasionner des effets néfastes,
- D'autre part, les conséquences en mettant en place des mesures adéquates pour atténuer les effets dommageables (par exemple, concept d'urgence).(Schleiss et Pougatsch, 2011).

II.3. Cadre théorique de l'analyse des risques

II.3.1. Généralités

Il n'existe pas de processus unique pour effectuer une analyse de risques. Cependant, la démarche choisie doit permettre d'identifier les risques ainsi que les incertitudes qui leur sont liées. Ainsi, il s'agit de :

- Déterminer quels sont les événements désastreux probables qui pourraient survenir,
- D'en estimer leur probabilité d'occurrence d'en évaluer les conséquences.
- Élaborer les conclusions nécessaires, pour décider des moyens à mettre en œuvre en vue de réduire les risques qui pourront être mis en évidence.

La démarche pour réaliser une étude de risque est résumée dans la figure II.5.

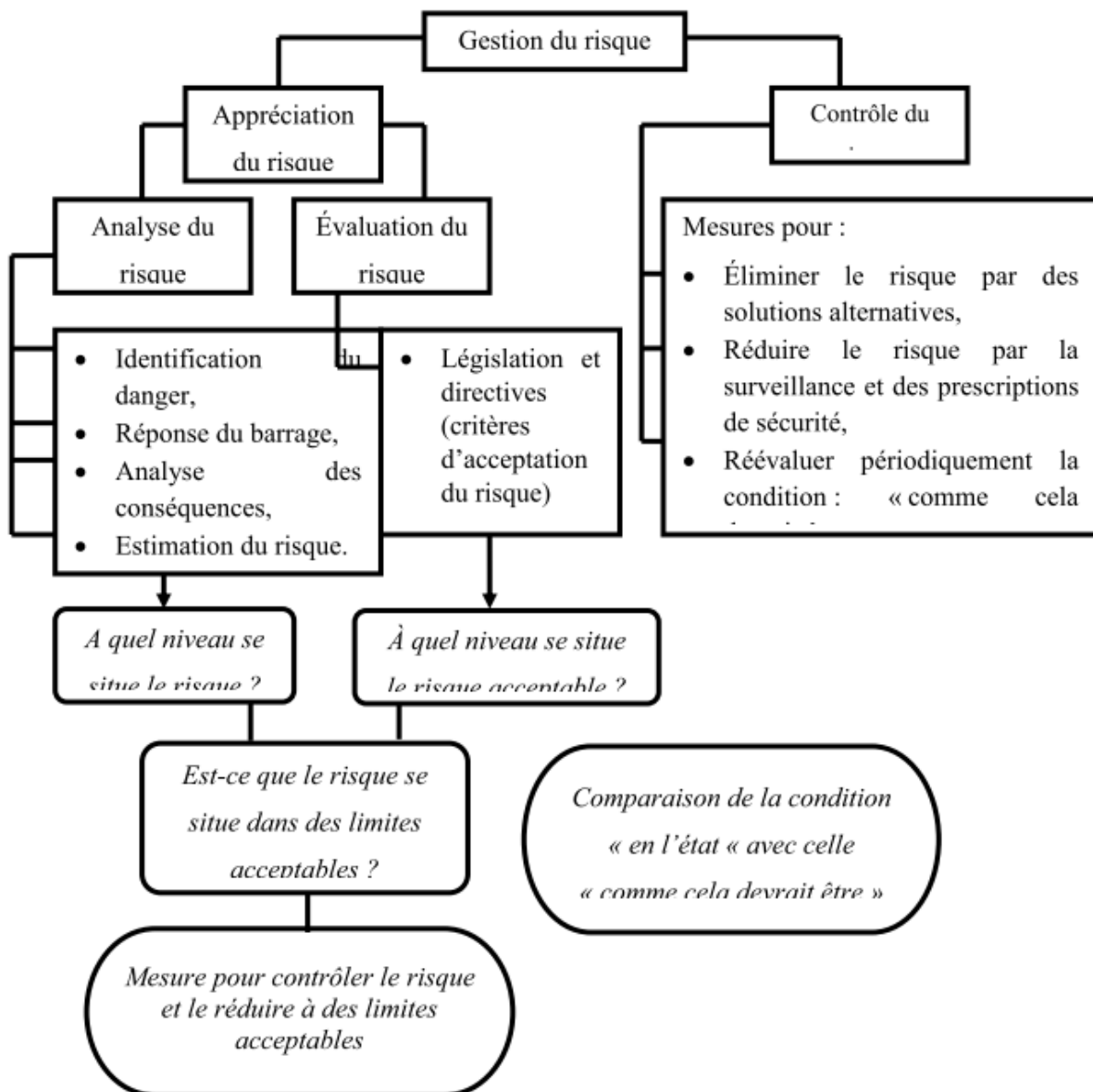


Figure II.5 : Schéma de la démarche pour une étude de risques
(Selon Faber et Stewart, 2001).

Le Schéma donnant le cadre général de la gestion du risque est donné dans la figure II.6.

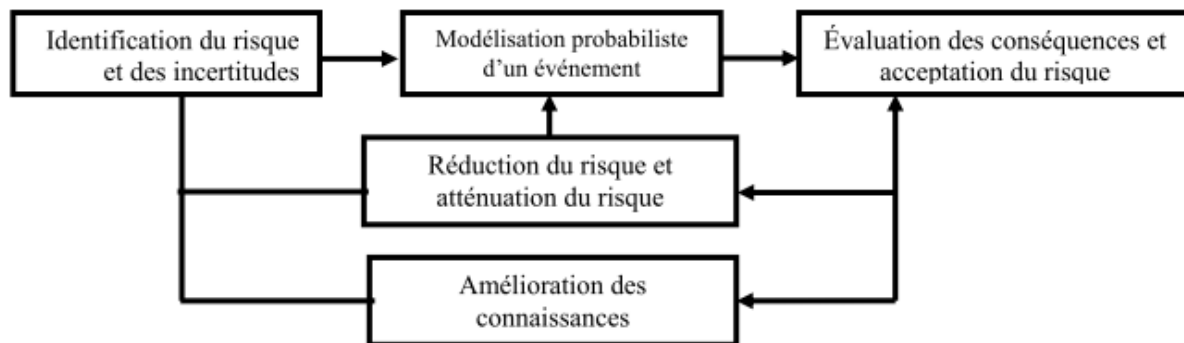


Figure II.6 : Schéma du cadre général de la gestion du risque
(Selon Faber et Stewart, 2001).

II.3.2. Structure de l'analyse des risques

Le processus d'analyse de risques comprend plusieurs étapes dans le but de déterminer :

- Si le risque associé à une certaine activité est acceptable,
- Ou pour servir de base de prise de décision.

Sur le tableau II .3 ci-dessous, nous donnons à titre d'exemple les points principaux traités dans une analyse de risque.

Tableau II.3 : Exemple de séquences d'une analyse de risques (Selon Fiber et Stewart, 2001).

Définition du cadre de l'analyse des risques	Description du contexte Définition du système
Analyse du risque	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des dangers et de ses sources (scénarios) • Estimation des risques : <ul style="list-style-type: none"> ○ Analyses des conséquences et des probabilités, ○ Scénarios des risques (étude de sensibilité).
Évaluation des risques	<ul style="list-style-type: none"> • Acceptation du risque • Prise de décision(s) /Analyse d'option(s)
Contrôle du risque	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement des risques (gestion des risques) • Surveillance et suivi.

II.3.3. Définition du cadre de l'analyse des risques

Il faut d'abord :

- Définir clairement le contexte dans lequel l'analyse de risques sera effectuée. Les problèmes identifiés et les objectifs fixés.
- Connaître à qui sont destinés les résultats de l'analyse et évaluer les aspects politiques, sociaux, financiers et économiques qui peuvent influencer le déroulement de l'analyse.

La définition des risques acceptables en fonction de la sécurité des personnes (préjudice, maladie ou décès), des problèmes économiques (destruction, perte de production) et des critères environnementaux (dégradation de l'environnement, impact sur la faune et la flore) constitue une phase importante de l'analyse du risque.

Il est bon à préciser que le système et ses caractéristiques (techniques, cadre environnemental)

Ainsi que son organisation permettent de bien comprendre son fonctionnement et son comportement. La description du système influencera le niveau de détail de l'analyse (Schleiss et Pougatsch, 2011).

II.3.4. Analyse du risque

Pour réaliser une analyse de risque, il faudrait : Faire une identification des dangers et de leurs sources, une analyse par arbres logiques de défaillances et d'évènements et prendre en compte les incertitudes.

- Identification des dangers et de leurs sources

A la question « que pourrait-t-il se passer ? » Correspond une étape d'identification de l'ensemble des dangers potentiels et de leur(s) source(s) dont les conséquences seront probablement néfastes aux populations, à l'économie, et à l'environnement. Les sources sont liées à des causes diverses à savoir : techniques, naturelles, ou humaines.

Il faut relever que dans le domaine du Génie Civil, l'erreur humaine peut intervenir aux stades du projet, de la réalisation, de l'exploitation et de l'entretien. Il y a lieu de mentionner qu'un danger peut conduire à la ruine totale ou partielle du système global ou d'un de ses composants, voire d'un sous-système. Il est adéquat de dresser une liste de tous les modes de rupture en ne retenant que ceux qui sont les plus plausibles. Il ne faut pas négliger les résultats des inspections in situ qui permettent de mettre en évidence des points faibles. Ces derniers devraient aussi entrer en ligne de compte dans la sélection des causes

primaires. Cette démarche donne la possibilité de tirer les conclusions adéquates pour la suite de l'analyse.

Dans un premier temps, on peut envisager une analyse préliminaire des dangers en identifiant de manière simple les événements conduisant à des situations critiques, leurs causes possibles et enfin leurs effets. Des premières mesures pourraient être aussi envisagées. L'étape suivante consiste à rechercher et à analyser divers scénarios sur la base d'un système logique. Diverses techniques d'identification de modes de défaillances et de leurs effets ont été développées. Ils donnent aussi des informations utiles pour l'établissement d'arbres logiques.

Enfin, il est important à ce niveau de l'étude de recourir à l'expérience acquise notamment en recourant à un jugement d'expert et en réunissant une documentation relative à des événements ayant conduit à des accidents, voire des ruptures (Schleiss et Pougatsch, 2011).

- Analyse par arbres logiques de défaillances et d'évènements

Un point fondamental de l'analyse de risque concerne l'établissement d'arbres logiques qui mettent en relation des événements initiateurs (causes) et leurs conséquences (événements conduisant à une condition critique). Cette approche séquentielle offre la possibilité de préciser une suite d'évènements individuels aboutissant à des dommages indésirables, éventuellement à la rupture. Une probabilité d'occurrence est assignée à chaque branche de l'arbre. Ces probabilités peuvent être obtenus par :

- Une analyse statistique (probabilité objective),
- Un jugement d'experts (probabilité subjective),
- Voire une combinaison des deux.

- Prise en compte des incertitudes

L'incertitude est la notion délicate et omniprésente dans le domaine des ouvrages. Nous citons à titre d'exemple le cas des barrages. Cette tâche consiste à examiner quelles sont leurs sources, dont les plus courantes, lorsqu'il s'agit de risques figurant dans le tableau II.4 (Kreuzer, 2000).

Tableau II.4 : Sources des incertitudes cas d'un barrage (Kreuzer, 2000).

Sources/ Types	Exemple d'origine	Traitement analytique
Physique	Connaissances imparfaites de la géologie, de l'hydrologie, du comportement mécanique	Densité de probabilité bornée, simulation de Monte-Carlo
Statistique	Dispersion d'un échantillon à l'autre	Ecart type, erreur moyenne, limites de confiance
Epistémique	Modèles mathématiques simplifiés	Simulation de Monte-Carlo, théorie de Bayes, arbres d'événements
Décision	Idées humaines subjectives sur une condition cachée	Arbres d'événements, théorie de Bayes
Prédiction	Événement futur incertain	Arbres d'événements, Théorie de Bayes
Réaction du public	Manque de confiance, impossibilité de faire régner la confiance	Communication
Erreur humaine	---	Théorie des erreurs grossières

Le traitement des incertitudes est varié et peut être abordé de trois manières :

- Les cerner par un supplément d'information,
- Les éviter par une modification du projet voire la mise en œuvre d'actions,
- Les prendre des mesures préventives et de formation.

II.3.5. Estimation du risque

L'estimation des risques passe par l'analyse des conséquences et l'évaluation des probabilités.

- Analyse des conséquences

L'analyse des conséquences dans le cas d'un barrage par exemple, consiste à évaluer les dommages à l'aval suite à un écoulement incontrôlé consécutif à la rupture totale ou partielle d'un barrage voire un passage par-dessus le couronnement. Les répercussions d'une telle catastrophe vont directement affecter la population et son environnement. Pour obtenir une évaluation de l'impact, il y a lieu de définir le mode de rupture et de calculer l'extension d'une onde de submersion.

- Les conséquences d'une rupture engendrent :
 - D'une part, des pertes directes pour tout ce qui se trouve dans la zone inondée,
 - D'autre part, des pertes indirectes telles les répercussions sur l'économie, ainsi que des effets telles des atteintes physiques et morales au sein de la population et une perte de confiance de celle-ci.
- Les conséquences se mesurent :
 - En termes d'unité monétaire pour les dommages sociaux, économiques et environnementaux qui ont été causés
 - Et en termes de mise en danger de vies humaines. On a essayé de quantifier la valeur économique des victimes, ce qui ne va pas sans poser un problème d'éthique, car on admet que des vies sont en jeu (Schleiss et Pougatsch, 2011).
- Évaluation des probabilités
 - Les données utiles pour une analyse de risque sont obtenues à partir de base de données statistiques concernant les ruptures et les incidents, par des avis d'ingénieur expérimentés et par traitement analytique (Kreuzer, 2000).
 - L'évaluation des probabilités, d'occurrence, qui sont présentes à divers stades de l'analyse, dépend de la qualité des données disponibles, ce qui implique une recherche rigoureuse. Il est aussi recommandé de les examiner et de vérifier si leur niveau est approprié avec d'objectif fixé. Par ailleurs, il faut relever que le nombre des données nécessaires sera différent selon que la décision à prendre se situe à un niveau préliminaire ou définitif (Figure n°12).
 - Les statistiques sont utiles pour :
 - ✓ Apprécier les probabilités utilisées pour les arbres logiques de défaillances et d'événement,
 - ✓ Effectuer des analyses coûts-bénéfices de barrages moyens
 - ✓ Calibrer les jugements.

La littérature offre passablement de données, toutefois le progrès passe par une meilleure qualité et une meilleure diffusion des informations (Kreuzer, 2000).

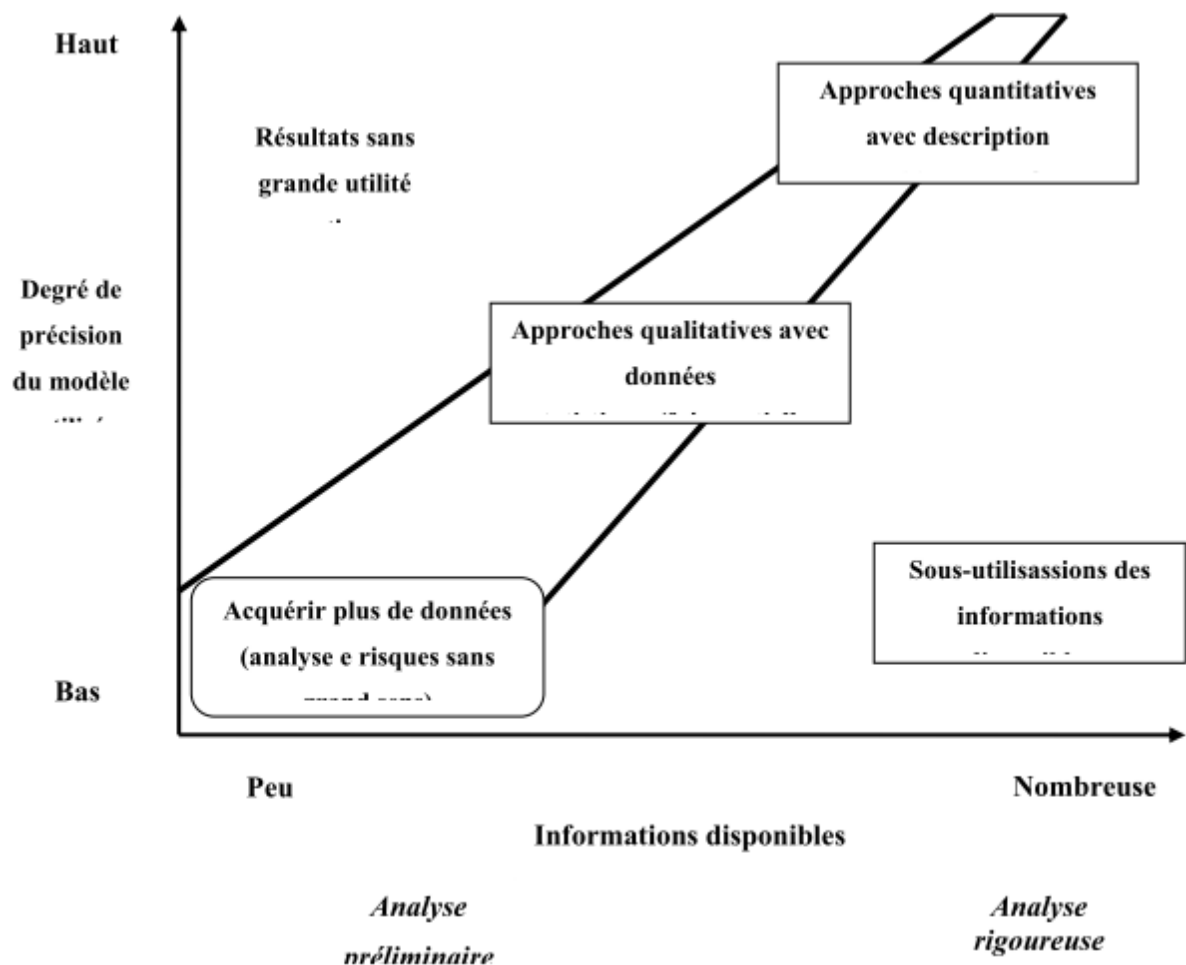


Figure II.7 : Hiérarchie des démarches

Type de technique et niveau d'information (selon Kreuzer, 2000).

II.3.6. Évaluation du risque

Évaluer un risque, c'est le calculer, l'accepter, prendre une décision, le surveiller et le suivre.

II.3.6.1. Calcul du risque

Selon Schleiss et al., (2011), le risque est défini par le produit de la probabilité d'une conséquence particulière avec l'importance de cette conséquence exprimée par exemple en unité monétaire. Le risque total est donné par la somme de toutes les conséquences possibles en unité monétaire : $R = (P \times C)$

II.3.6.2. Acceptation du risque

Il est souhaitable que le risque soit réduit à un niveau jugé admissible (acceptable, voire tolérable) par la société.

L'acceptation du risque dépend généralement de :

- La valeur attribuée aux choses,
- La confiance, de l'attitude de la société.

Savoir si le risque est tolérable implique une démarche extrême, qui sort du domaine couvert par les méthodes de quantification habituelles. La dimension humaine et les personnes concernées prennent position face à eux. Afin de déterminer la tolérance aux risques posés par les ouvrages d'accumulation, il convient donc de déterminer l'attitude qu'une population pourrait avoir face aux conséquences négatives d'un événement sortant de l'enveloppe des phénomènes généralement admis.

Cette attitude dépend quant à elle de multiples facteurs tels que :

- Situation socioculturelle des personnes concernées,
- Échelle des valeurs de la société touchée par l'événement,
- Évolution générale des besoins en sécurité,
- Projet de développement d'un territoire, etc. (CSB, 2003).

Les domaines, touchés par ce volet, sortent d'évidence du champ d'activité de l'ingénieur.

L'irrationnel intervient pour une part importante dans la perception par la population d'un danger mal défini. Les disciplines aptes à caractériser cette tolérance au risque sont à rechercher dans le domaine des sciences humaines.

Par ailleurs, l'analyse de risque met en balance, dans sa démarche, les pertes de vies humaines et leur probabilité d'occurrence. Implicitement, elle admet que certaines vies puissent être potentiellement sacrifiées, pour autant que la viabilité d'un projet le justifie.

Par rapport aux conséquences sur les personnes, on peut énoncer deux critères :

- Le risque individuel qu'une personne et prête à admettre pour elle-même et qui peut être différent selon que l'individu est placé volontairement ou non dans situation critique ;
- Le risque sociétal qui traduit le fait que plus un événement peut entraîner de victimes, plus il est collectivement insupportable.

L'évaluation du risque met en parallèle les risques calculés (probabilités d'événements x conséquences) et des niveaux des risques jugés admissibles par la société ou le maître d'ouvrage.

Le développement des critères de l'acceptation du risque fait appel à :

- La perception du risque (garantir un niveau de risque de système acceptable ou tolérable),

- L'analyse pour une décision formelle (technique d'analyse pour équilibrer et comparer le risque par rapport au bénéfice),
- Des objectifs pour une sécurité réglementée (cadre législatif, directives pour l'élaboration et l'exécution de critères d'acceptation du risque) (Faber et Stewart, 2001).

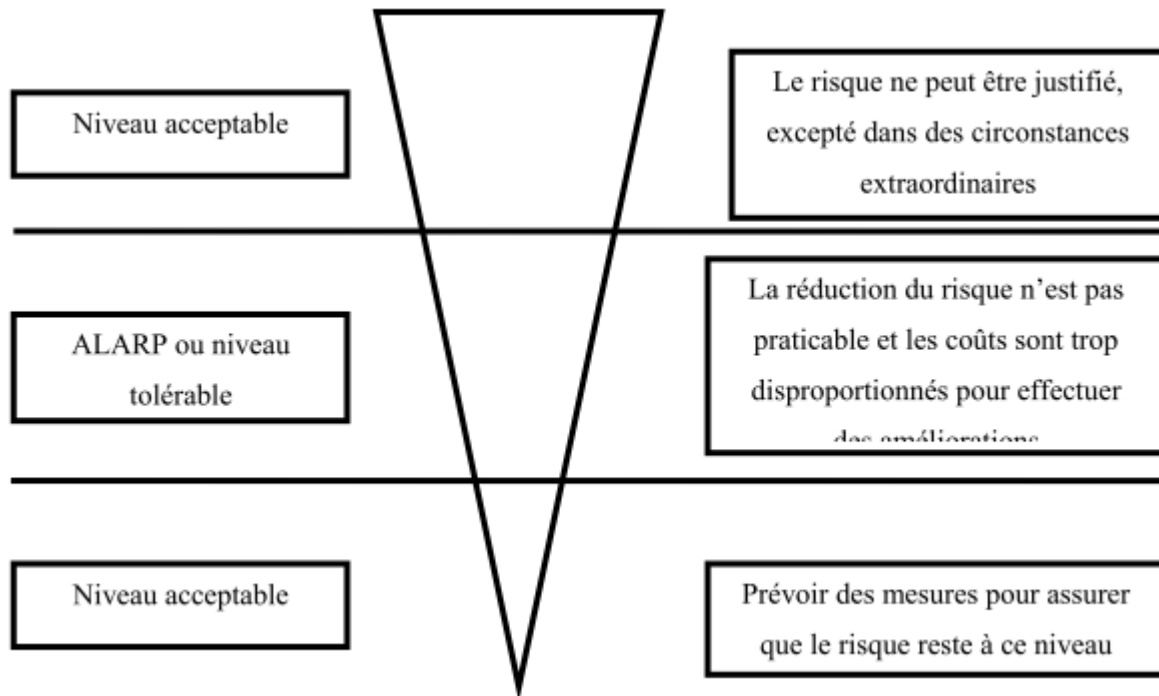


Figure II.8: Niveau de risque et ALARP (selon Faber et Stewart, 2001).

Le critère de l'acceptation du risque généralement adopté par différentes autorités est que le risque doit rester :

- « Aussi faible que raisonnablement possible » (as Low as Reasonably Possible, ALARP)
- Ou « aussi faible que raisonnablement accessible » (as Low as Reasonably Attainable, ALARA).

Cela signifie que les mesures en vue de diminuer les risques peuvent être exécutées jusqu'à un niveau où toute réduction supplémentaire entraîne des dépenses fortement disproportionnées par rapport à celle déjà consenties.

Comme les termes « bas, raisonnable, possible et accessible » sont subjectifs, des tentatives ont été faites pour rendre ces critères plus concrets (Figure II.8).

On peut encore mentionner que les limites de tolérance et d'acceptabilité du risque sociétal

Sont généralement présentées sous forme d'un diagramme F/N, dans lequel F correspond généralement aux probabilités cumulées de défaillances dans les scénarios conduisant à des pertes en vie humaines et N le nombre des pertes en vie humaines (Figure II.9).

Les diagrammes du risque socialement acceptables sont basés sur des évaluations des statistiques relatives aux accidents et à la perception du risque dans chaque pays.

Selon différentes recommandations, les limites tolérables se situent entre 10^{-4} et 10^{-5} ou 10^{-6} / an/ personne. Cependant, certains manifestent un certain scepticisme pour l'emploi de tels diagrammes ou signalent leur coté subjectif. De tels diagrammes sont disponibles notamment en Australie, aux Etats-Unis, en Afrique du Sud, aux Pays-Bas et au Canada, en Suisse.

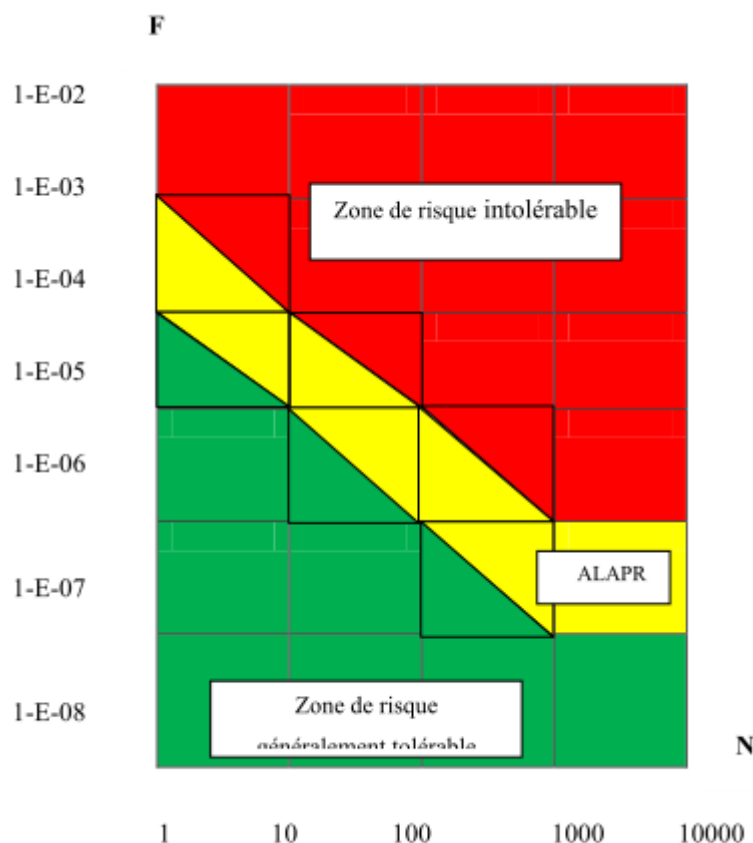


Figure II.9 : Exemple de diagramme F/N (Selon ANCOLD).

F = probabilités cumulées de défaillance

N = nombre de perte en vies humaines (selon ANCOLD)

(ALAPR = « as low as reasonably practicable »).

II.3.6.3. Prise de décision

L'analyse des risques est étudiée dans le cadre de prise de décision et d'analyse d'option. Pour les spécialistes, elle peut être particulièrement utile s'agissant de l'aspect coût/bénéfices, car elle met en relation la recherche d'une réduction du risque et celle des coûts engendrés. Au stade des études, cette méthode est une aide pour une comparaison entre différentes conceptions et les facteurs qui peuvent avoir une incidence sur la rupture. Elle offre la possibilité d'évaluer le risque à tout moment de la vie d'un ouvrage (Projet, construction, première mise en eau, exploitation) et en cas de besoin de préciser la nécessité d'entreprendre des études supplémentaires ou d'envisager des mesures d'amélioration de la sécurité. En outre, l'analyse de risque peut se révéler être une base pour fixer un programme des travaux et d'une stratégie d'investissement.

Enfin, l'analyse de risque pourrait également jouer un rôle dans le domaine des assurances responsabilités. Dans certains pays, un propriétaire a l'obligation de s'assurer par la loi. Il est parfois préconisé le recours à une analyse de risque au lieu de se référer à des paramètres simplifiés comme le volume de la retenue pour fixer les primes (Lafitte 1996).

II.3.7. Contrôle du risque

Le Contrôle du risque, c'est son traitement sa surveillance et son suivi

II.3.7.1. Traitement des risques

Il est reconnu qu'un risque ne peut être entièrement éliminé. Une gestion intelligente des risques doit tendre à identifier les risques qui peuvent être atténués et ceux qui doivent être gérés. Par ailleurs, si une analyse de risques devait montrer que des risques calculés ne sont pas acceptables, il sera alors nécessaire de prendre des mesures adéquates. Diverses solutions sont à disposition pour pouvoir agir en conséquence. Une première mesure consiste à atténuer le risque en apportant des modifications au système.

Un exemple serait la transformation d'un évacuateur de crue afin d'augmenter sa capacité ou l'adaptation du système de commande de vannes pour éviter toute manœuvre intempestive. Il est envisageable de réduire le risque en recherchant à limiter les conséquences, par exemple, par la réalisation de travaux de protection contre les crues de sites situés en aval. Le transfert des risques est un élément courant des stratégies de la gestion des risques. Il peut être envisagé en contractant une assurance pour couvrir les conséquences d'un événement ou en trouvant d'autres arrangements financiers avec tiers après consultation et accord entre parties concernées. En principe, des risques qui n'ont pas d'implication financière ne sont pas transférables. Enfin, intervenir sur l'acceptation du risque peut être une

option, notamment, si les coûts des solutions précédentes conduisent à des coûts disproportionnés par rapport à ceux entraînés par le risque encouru si l'évènement se produit.

II.3.7.2. Surveillance et suivi

L'analyse de risque peut être considérée comme un processus évolutif alimenté en permanence par des informations en provenance du système concerné. Par le suivi, il est possible d'évaluer à intervalle régulier, la portée des décisions prises en relation avec les risques (Schleiss et al.,2011)

II.4. Conclusion

Ce chapitre a eu pour objectif, la présentation de tous les aspects relatifs à la notion de risque à savoir :

- Le concept du risque,
- La démarche de sa gestion
- Sa maîtrise.

Ces paramètres font partie d'un processus itératif d'analyse et d'évaluation du risque pour pouvoir mettre en place les barrières de sécurité suffisantes pour atteindre un niveau de risque acceptable.

Néanmoins, tout n'est pas connu et maîtrisable. Ainsi, il y a toujours des incertitudes dans certains cas. C'est pourquoi, le principe de précaution doit être adopté.



Chapitre III

Analyse déterministe d'un problème géotechnique

III.1. Introduction

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets géotechniques de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Conditionnée par les progrès effectués dans les domaines informatiques et les acquis des mathématiques. Une étude déterministe fera l'objet de ce chapitre.

III.2. Géométrie du problème

On souhaite étudier le comportement d'un sol sous une fondation Avec :

- Un module d'élasticité $E = 10^5 \text{KN/m}^2$
- Un coefficient de Poisson $\nu = 0,3$

La semelle a une largeur de 2 m et supporte une charge uniformément répartie Cinq mètres sous la semelle, le sol est constitué d'une formation rocheuse solide qui peut être considéré comme très rigide. (Khennane, 2013).

La définition géométrique retenue pour cette étude est représentée sur la figure III.10, suivante :

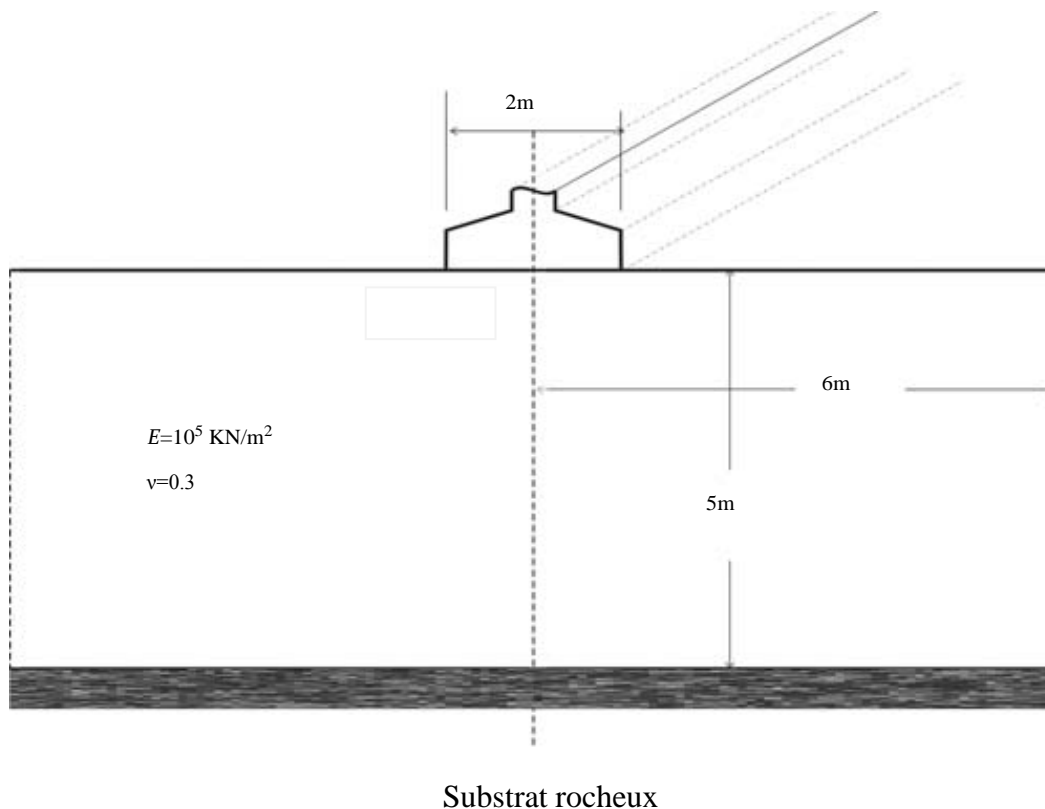


Figure III.10. Représentation schématique (Khennane, 2013).

III.3. Rappel théorique

III.3.1. Introduction

On appelle fondations, les parties enterrées d'un ouvrage conçues pour transmettre au sol de manière rationnelle, les charges provenant de la superstructure.

Lorsque les caractéristiques mécaniques du sol sont convenables au voisinage de la surface, les fondations sont exécutées avec un encastrement minimum dans le sol.

On réalise dans ce cas, des fondations superficielles dont l'encastrement $\ll D \gg$ est inférieur à 4 ou 5 fois de la largeur $\ll B \gg$. Dans le cas contraire, on a affaire à des fondations profondes. (Melbouci, 2009)

Exemples de fondations superficielles :

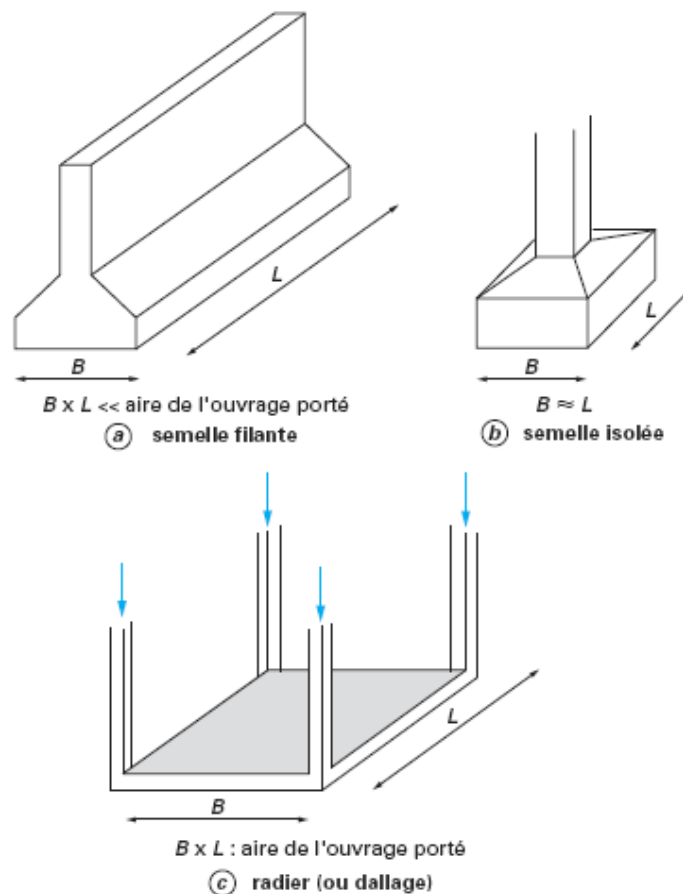


Figure III.11: Types de fondations superficielles

L : Largeur de la semelle

B : Base de la semelle

III.3.2. Capacité portante et tassement

Dans un premier temps, l'ingénieur géotechnicien, cherchera à fonder son ouvrage superficiellement, pour des raisons de coût évidentes (si des conditions particulières liées au projet, au site ou aux sols ne le lui interdisent pas, évidemment). Il devra, alors, se préoccuper en tout premier lieu de la capacité portante de sa fondation, c'est-à-dire vérifier que les couches de sol superficielles peuvent effectivement supporter la charge transmise. Si le résultat des calculs est concluant, notamment s'il n'aboutit pas à une aire de la fondation prohibitive, il doit alors s'assurer que son tassement sous les charges de fonctionnement prévues (courantes ou exceptionnelles) est dans des limites admissibles. Capacité portante et tassement sont ainsi les deux éléments fondamentaux qu'il y a lieu de considérer systématiquement lors du calcul des fondations superficielles.

Les notions de capacité portante et de tassement sont clairement illustrées par la figure ?? qui représente une courbe typique obtenue lors du chargement d'une fondation superficielle. La largeur de la fondation est notée B et la profondeur où est située sa base est notée D .



Figure III.12: Courbe chargement-tassement d'une fondation superficielle

Au début du chargement, le comportement est sensiblement linéaire, c'est-à-dire que le tassement croît proportionnellement avec la charge appliquée. Puis le tassement n'est plus proportionnel (on peut dire qu'il y a création et propagation de zones de sol plastifiées sous la fondation). À partir d'une certaine charge Q_l , il y a poinçonnement du sol ou tout du moins un tassement qui n'est plus contrôlé. Le sol n'est pas capable de supporter une charge supérieure (on peut dire que l'on a atteint l'écoulement plastique libre).

Cette charge Q_l est la capacité portante de la fondation (on parle aussi souvent de charge limite, de charge de rupture ou encore de charge ultime). Le dimensionnement correct de la fondation d'un ouvrage consistera, notamment, à s'assurer que l'on reste en deçà de

cette charge limite, avec une certaine marge quantifiée par un coefficient de sécurité, et que les tassements correspondants sont admissibles (point Q_d, s_d sur la figure III.12).

III.3.3. Méthodes de calcul de la capacité portante d'une fondation superficielle

La capacité portante d'une fondation superficielle peut être calculée par 2 méthodes :

- La première consiste à appliquer au sol la théorie de la plasticité, donc elle implique la connaissance de la cohésion « C » et de l'angle de frottement interne « ϕ » du sol.
- La deuxième consiste à appliquer des méthodes empiriques ou semi-empiriques basées sur l'interprétation directe des essais in-situ.

(Melbouci, 2009)

A partir des essais de laboratoire méthode « c- ϕ »

Le calcul de la capacité portante des fondations superficielles à partir de cet ϕ est probablement le problème le plus connu de la mécanique des sols contemporaine et tous les manuels du domaine y font largement référence. Pour la définition des paramètres de résistance au cisaillement c et ϕ , à court terme (en contraintes totales) et à long terme (en contraintes effectives).

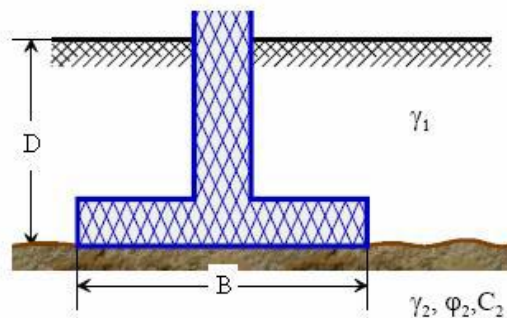


Figure III.13. Fondation filante encastrée

La capacité portante est donnée par la formule suivante :

$$q_u = \left(\frac{1}{2} \times s_y \times \gamma_2 \times B \times N_\gamma \right) + (s_q \times \gamma_1 \times D \times N_q) + (s_c \times C \times N_c)$$

Les valeurs des N_γ, N_q, N_c dépendent des hypothèses de calcul et peuvent varier suivant les auteurs.

$S_y = S_q = S_c = 1$ pour une semelle filante.

$D=0$: pour une fondation de base en contact direct avec la surface du sol.

Pour une semelle de forme quelconque :

$$s_z = 1 + 0,2 \frac{B}{L}$$

$$s_y = 1 - 0,2 \frac{B}{L}$$

$$s_q = 1$$

q_u : Contrainte de rupture (capacité portante par unité de surface),

γ_1 : Poids volumique du sol latéralement à la fondation,

γ_2 : Poids volumique du sol sous la base de la fondation,

C : Cohésion du sol sous la base de la fondation.

D : Encastrement de la fondation.

III.4. Méthode d'analyse par éléments finis.

III.4.1. Introduction

La MEF a été utilisée beaucoup dans la pratique d'ingénierie depuis plus de trente années. C'est bien récemment qu'elle a commencé à être utilisée largement pour analyser des problèmes de la géotechnique. C'est probablement parce qu'il y a beaucoup de questions complexes qui sont spécifiques à la géotechnique, dont les réponses n'ont été trouvées que récemment.

Quand cette méthode est correctement utilisée, elle peut produire des résultats réalistes qui aident à trouver des solutions aux problèmes d'ingénierie du sol. Une bonne analyse qui simule le vrai comportement du sol permet à l'ingénieur de comprendre mieux ces problèmes. (Achi, 2011)

La méthode des éléments finis donc est une technique récente à caractère pluridisciplinaire car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base :

- La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité, etc.
- L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires, etc.
- L'informatique appliquée : techniques de développement et de maintenance de grands logiciels.

III.4.2. LES AVANTAGES DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS :

Comme mentionné précédemment, la méthode des éléments finis a été appliquée à de nombreux problèmes, structurels et non structurels. Cette méthode présente un certain nombre d'avantages par rapport aux méthodes approximatives conventionnelles, telles que présentées

par les cours traditionnels de mécanique des matériaux, pour la modélisation et la détermination des quantités physiques, telles que les déplacements, les contraintes, les températures, les pressions et les courants électriques, etc.

Ces avantages comprennent la capacité de :

- Modéliser des corps de forme irrégulière assez facilement.
- Gérer sans difficulté les conditions générales de charge.
- Modéliser des corps composés de plusieurs matériaux différents parce que les équations des éléments sont allouées individuellement. (Amirat et Beloufa, 2021).

III.4.3. Concepts de base

La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (**discrétiser**) une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple (**éléments finis**) interconnectés en des points appelés **nœuds**.

Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.

La MEF utilise des **approximations** simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques.

Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de **précision de l'approximation**.

Nous pouvons donc dire que : « Le milieu continu est subdivisé en un nombre fini d'éléments (éléments finis dans le comportement est définis par un nombre fini de paramètres).

L'obtention d'une solution exacte étant impossible, l'idée dans la M.E.F, est de chercher une solution approchée $U(x)$ sous la forme d'une combinaison linéaire de fonctions indépendantes connus $P(x)$, qui sont généralement des polynômes. (BOUKHARI, 2014)

Principe de la MEF :

1. Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage).
2. Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire $[K_e]$ reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux $\{U_e\}$ et les forces $\{f_e\}$ Appliquées aux noeuds : $[K_e]\{U\}=\{f_e\}$
3. Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global $[K]\{U\}=\{F\}$ de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds.
4. Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites.

5. Résoudre le système $[K]\{U\}=\{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds.
6. Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées. (BOUKHARI, 2014)

III.4.4. Les éléments pour l'analyse par éléments finis

Les types d'éléments utilisés dans La Méthode des Eléments Finis sont présentés dans le Tableau II.3, qui, pour le début, peuvent être classifiés en :




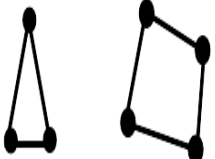
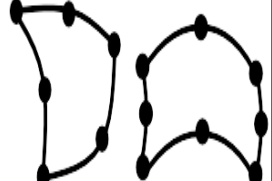

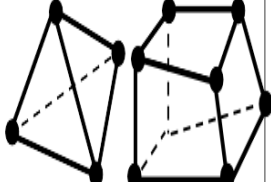
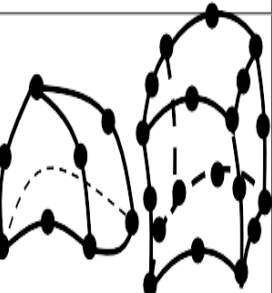

- éléments finis unidimensionnels
- éléments finis bidimensionnels
- éléments finis tridimensionnels

Les éléments finis sont générés par des points qui ne sont que des nœuds de la structure.

Il existe des éléments ayant un degré supérieur « cubiques » (qui sont les plus performants) mais le plus couramment sont utilisés les éléments linéaires et paraboliques.

Certains éléments finis ont des nœuds intérieurs pour améliorer la précision, mais l'utilisateur ne travaille pas avec ces nœuds. Ils sont générés et ensuite condensés dans la phase de calcul des matrices de rigidité des éléments. (Amirat et Beloufa, 2021).

Tableau III.5. Différents type d'éléments utilisés dans MEF. (Amirat et Beloufa, 2021).

Elément	Linéaire	Quadratique	Cubique
Unidimensionnel			
Bidimensionnel			
Tridimensionnel			

III.4.5. Présentation de l'outil numérique : logiciel MATLAB

Matlab est un langage de programmation informatique qui utilise des calculs et des algorithmes pour analyser de grandes quantités de données et les présenter dans des formats visuellement attrayants.

Certaines fonctionnalités de MATLAB incluent :

- Calcul de données numériques.
- Création de graphiques à usage scientifique.
- Modélisation et simulation de données.
- Analyse des données.

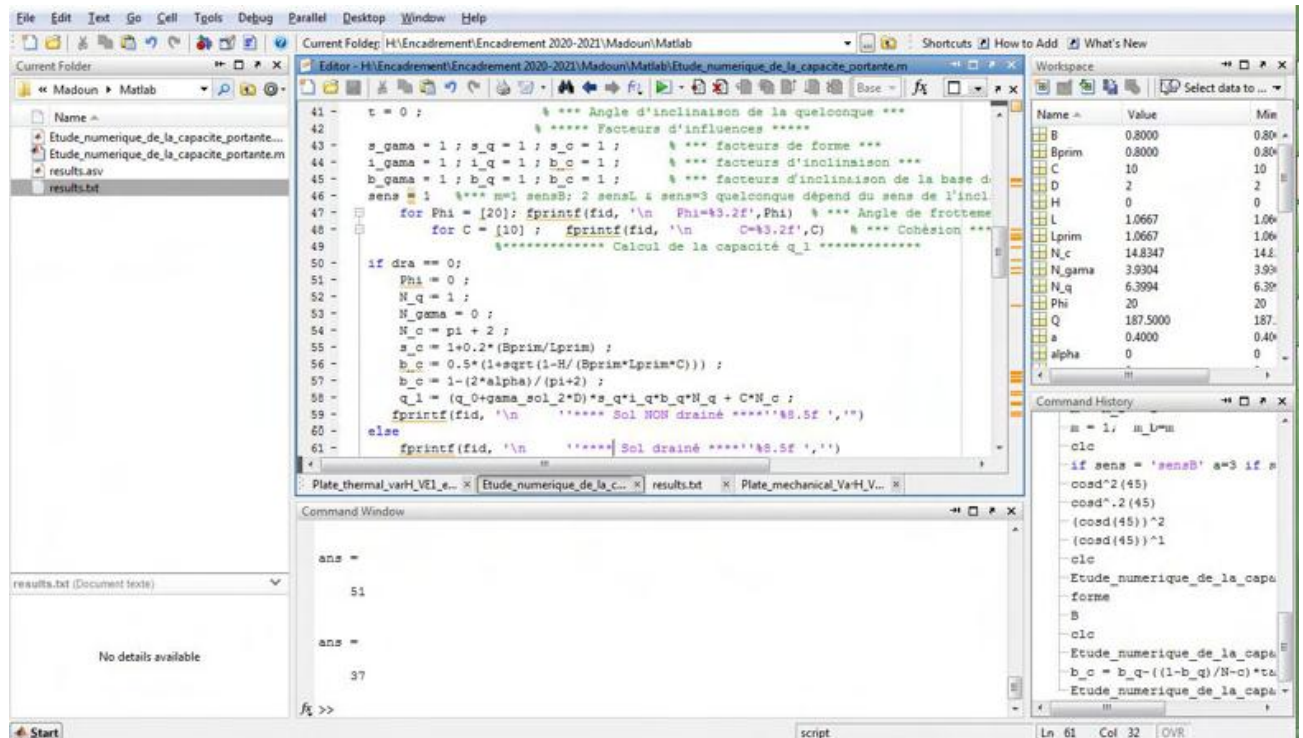


Figure III.14. Plan de travail MATLAB. (MADOUN et SOUIAH, 2021).

Comprendre Matlab :

En termes simples, il s'agit d'une version avancée et plus sophistiquée d'une calculatrice qui peut être exécutée sur votre ordinateur ou votre appareil mobile. On peut l'utiliser pour effectuer des opérations en utilisant l'interface de ligne de commande ainsi qu'un éditeur de texte. Il peut également être utilisé pour écrire des programmes et des fonctions qui effectuent des tâches continues. L'IDE Matlab contient une icône « aide », qui consiste en une explication détaillée de son fonctionnement. Cette fonctionnalité est très bénéfique pour les personnes qui débutent avec Matlab.

- **Qui utilise MATLAB ?**

Des millions d'ingénieurs et de scientifiques du monde entier utilisent MATLAB pour une gamme d'applications, dans l'industrie et le milieu universitaire, notamment l'apprentissage en profondeur et l'apprentissage automatique, le traitement du signal et les communications, le traitement d'images et de vidéos, les systèmes de contrôle, les tests et mesures, la finance informatique et la biologie informatique. (MADOUN et SOUIAH, 2021)

III.4.6. Exemple de problème plan (bidimensionnel).

III.4.6.1 Discrétisation géométrique.

Revenons à notre exemple présenté voir que la géométrie de la semelle est symétrique donc seule la moitié droite est discrétisée comme le montre la figure II.15, suivante :

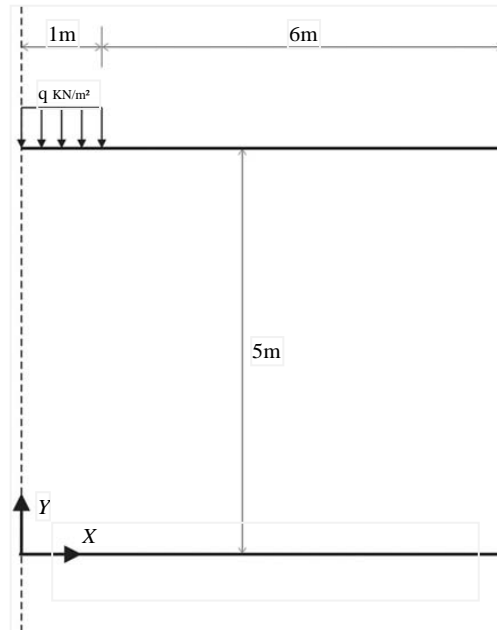


Figure III.15. Schéma Statique du Problème Etudié (Khennane, 2013).

Le domaine est discrétisé en utilisant 12 intervalles le long de la direction X, et 10 le long de la direction Y. Ceux-ci donnent une taille d'élément de 0.5 m dans les deux directions comme le montre la figure II.16, suivante :

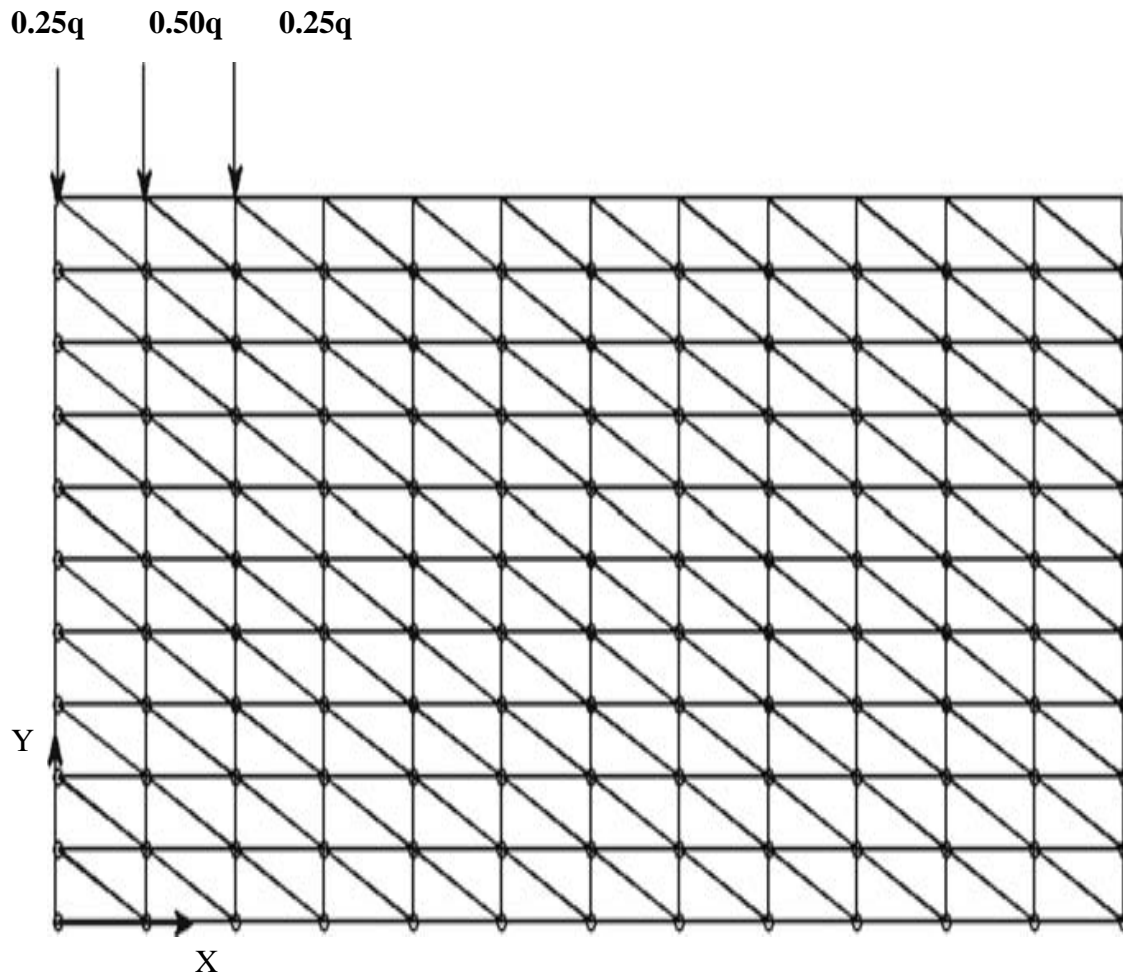


Figure III.16. Maillage avec l'élément triangulaire a trois-nœuds. (Khennane, 2013).

III.4.6.2. Organigramme d'un logiciel éléments finis MATLAB

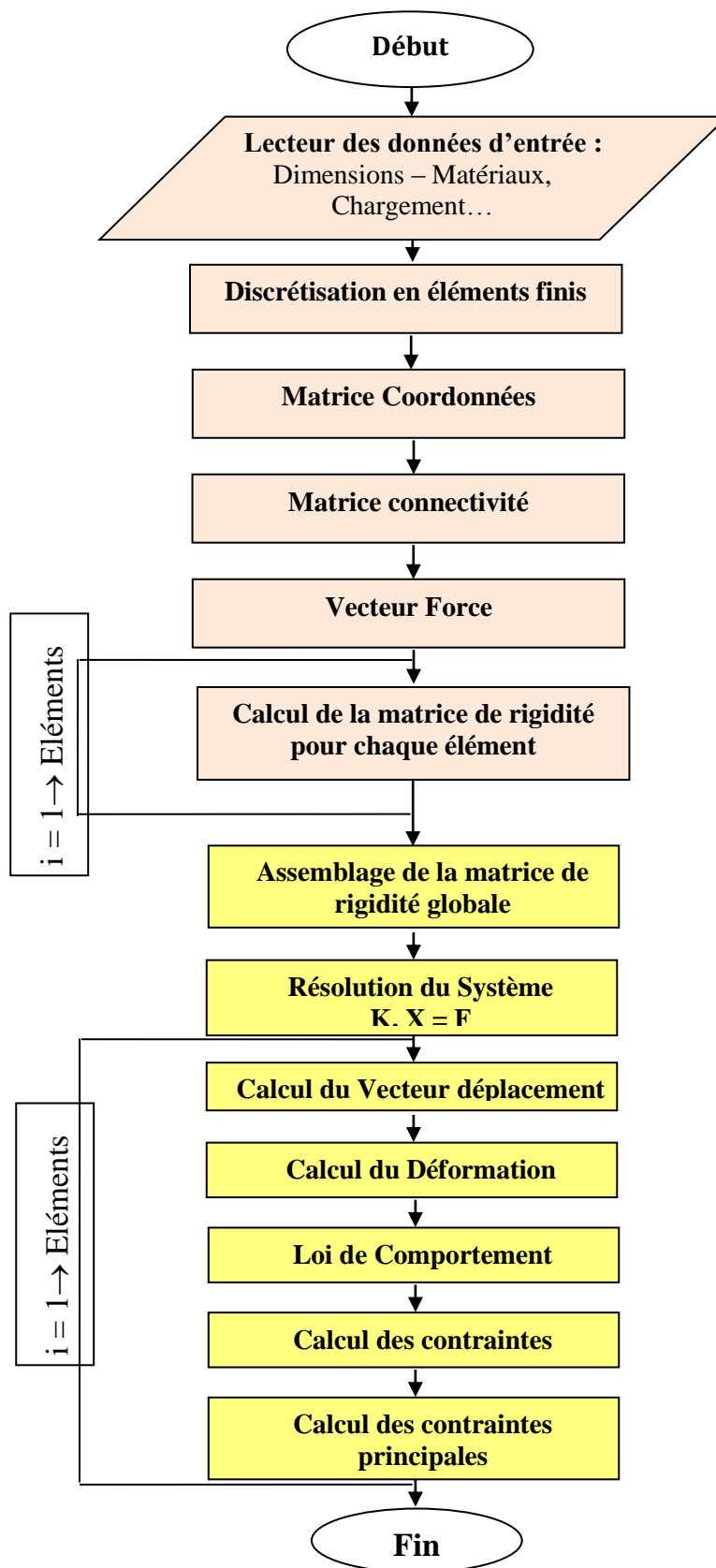


Figure III.17. Organigramme d'un logiciel éléments finis

III.4.6.3. Résultats du calcul : Contraintes plans

Les résultats donnés par l'outil numérique MATLAB sont représentées sur le tableau II.6, suivant :

Tableau III.6. Effet de la variabilité de la charge q de la contrainte maximale σ_{\max}

q (KN/m ²)	5	20	25	50	75	100	150
σ_{\max} (KN/m ²)	8	34	42	84	126	168	252

Commentaire :

Le calcul déterministe présenté montre que la valeur de la contrainte maximale reste acceptable jusqu'à une valeur égale à 75 KN/m²

Sur les figures suivantes on représente la répartition de la contrainte maximale dans le massif

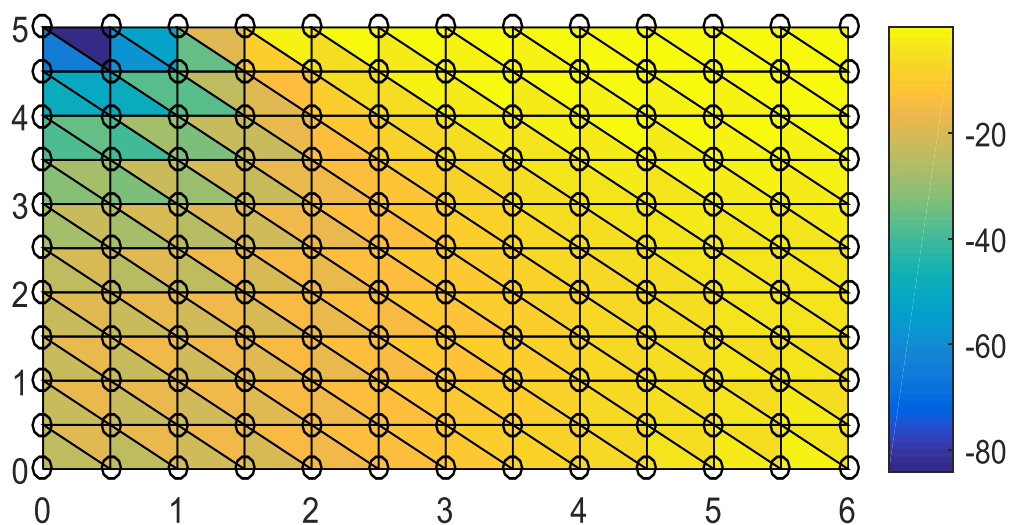


Figure III.18: Répartition de la contrainte maximale dans le massif. ($q= 50 \text{ KN/ m}^2$)

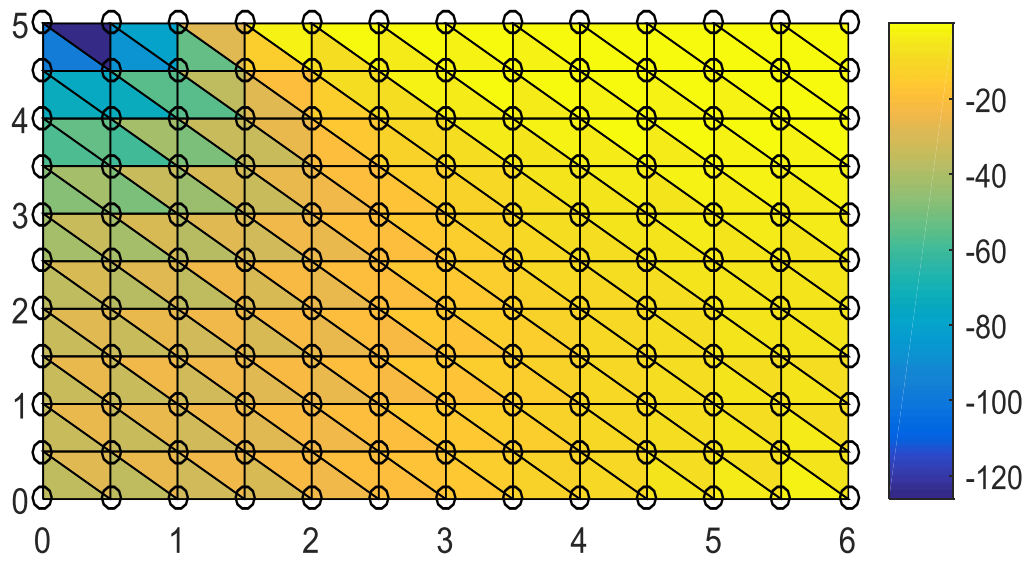


Figure III.19: Répartition de la contrainte maximale dans le massif. ($q=75\text{KN}/ \text{m}^2$)

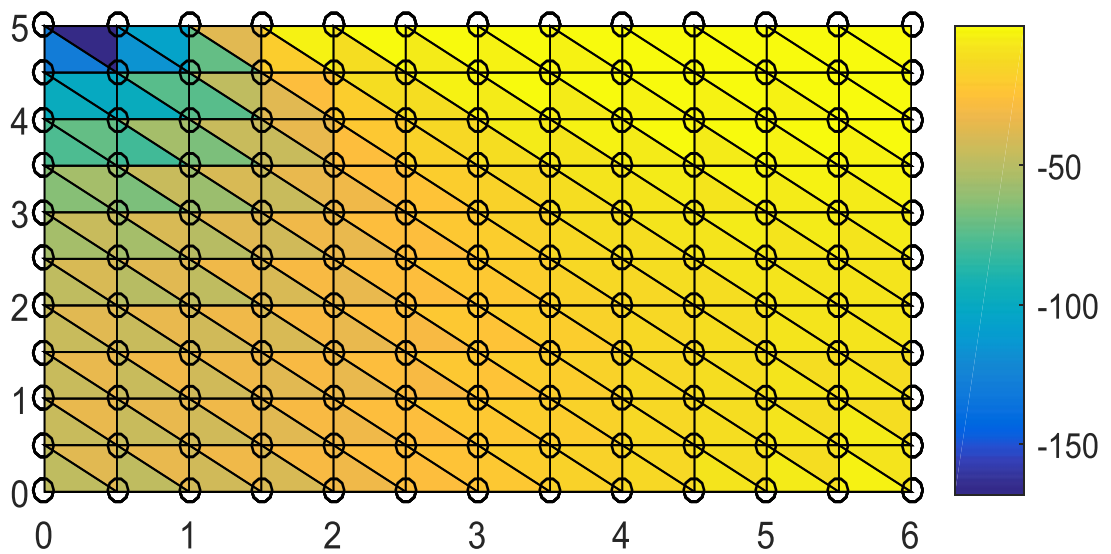


Figure III.20: Répartition de la contrainte maximale dans le massif. ($q=100\text{KN}/ \text{m}^2$)

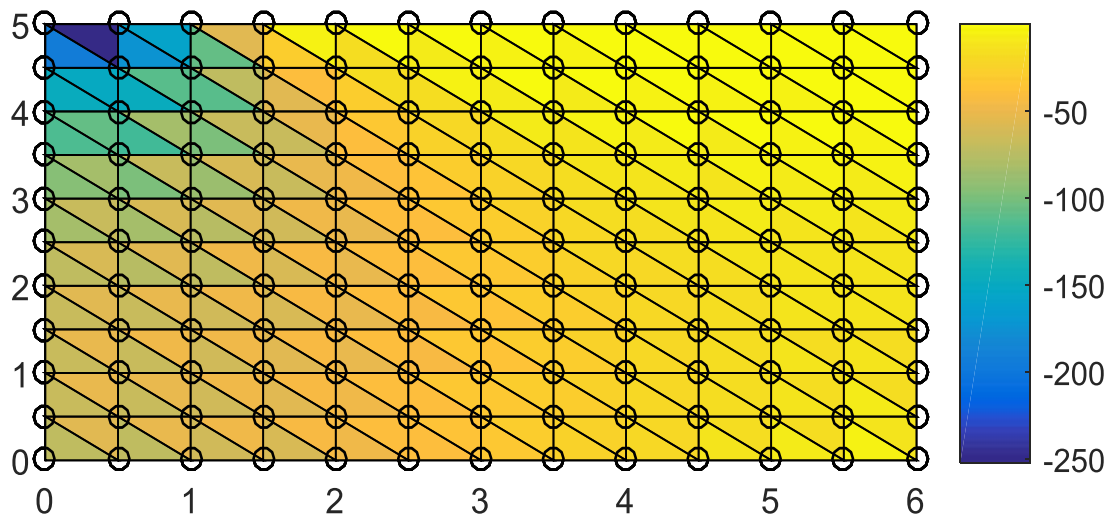


Figure III.21: Répartition de la contrainte maximale dans le massif. ($q=150\text{KN/ m}^2$)

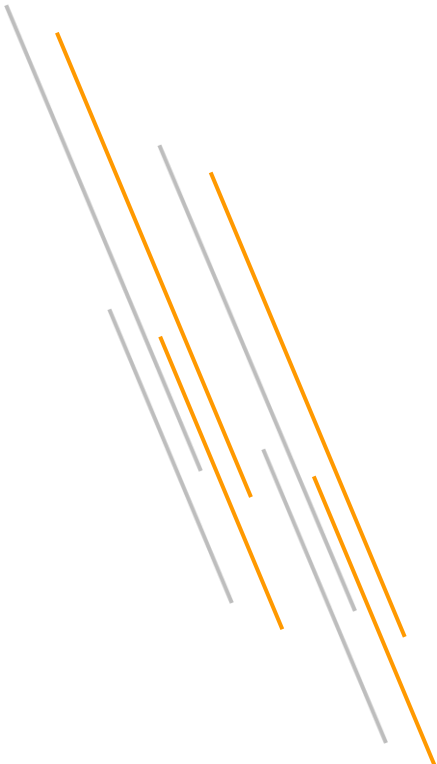
III.5. Conclusion

L'objectif de la modélisation (au sens large) en géotechnique est souvent la recherche d'une réponse, d'une solution à un problème particulier et complexe. La modélisation numérique est un outil puissant, elle est en constante progression depuis les années cinquante. Aujourd'hui, la modélisation intervient dans tous les domaines sans exception.

Les méthodes numériques en géotechnique ont pour but de décrire, d'expliquer ou de prédire le comportement d'une structure naturelle ou artificielle sur la base de lois physiques qui relient les variations des contraintes aux déformations et aux déplacements.

Dans ce chapitre on a présenté une méthode par élément finis. Les résultats montrent que la valeur de la contrainte maximale reste acceptable jusqu'au bout de valeur 75 KN/m^2 .

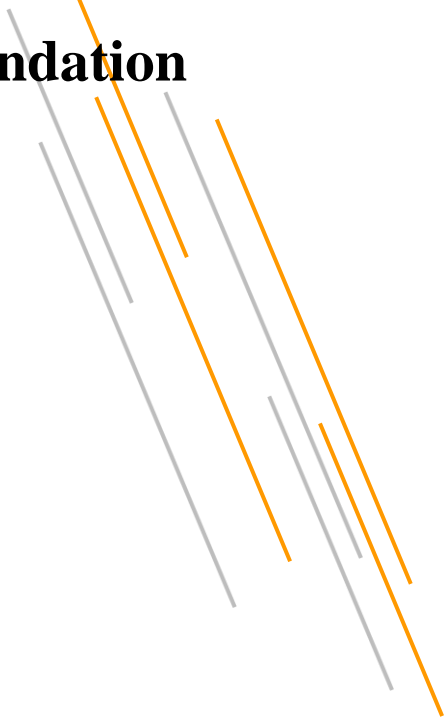
Mais vu la diversité dans les méthodes de calcul, l'écart entre les valeurs des facteurs de portance et la fiabilité de notre structure reste toujours une question à poser. Dans ce terme on propose une méthode numérique pour calculer la probabilité de défaillance dans ce que se suit.



Chapitre IV

Analyse Fiabiliste D'un Massif d'un Sol Sous

Une Fondation



IV.1. Introduction

Les données relatives aux structures de Génie Civil (Actions appliquées, propriétés des matériaux, géométrie) présentent des incertitudes de nature aléatoire. De même, les hypothèses simplificatrices retenues dans la conception de ces structures, les approximations nécessaires à leur modélisation et les coefficients de sécurité conduisent à des incertitudes qui amplifient celles liées aux données et au comportement du système mécanique. Ces données constituent donc des variables aléatoires. En fonction des réalisations de celles-ci, l'état d'une structure peut appartenir à deux domaines un domaine de défaillance et un domaine de sûreté. La frontière entre ces deux domaines est appelée surface d'état limite. L'utilisation des approches probabilistes nous permet d'estimer l'ampleur du risque pris et cela en considérant les paramètres de la structure étudiée comme étant des variables aléatoires et d'estimer la probabilité de défaillance. Dans ce qui suit, nous présentons l'application de cette approche à l'analyse de la stabilité d'un massif de sol sous une fondation.

IV.2. Analyse probabiliste

La simulation probabiliste est incontournable lorsqu'il s'agit de modéliser les phénomènes aléatoires.

IV.2.1 Définition de la simulation probabiliste

« **La simulation** » est une méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène physique ou un système mécanique par un modèle plus simple mais ayant un comportement analogue. Le système ou phénomène analysé peut être schématisé sous forme d'un modèle mécanique. L'objectif d'un modèle de simulation peut être simplement descriptif et consiste à :

- Étudier le comportement d'un système sous différentes hypothèses d'évolution de l'environnement
- Choisir la meilleure décision ou la moins mauvaise, en simulant plusieurs décisions envisagées (optimisation).

Dans le cas de la simulation probabiliste, les événements qui apparaissent, lors de l'évolution du système, ne sont pas connus avec certitude mais on est capable de probabiliser cette apparition.

En résumé, la simulation probabiliste est un outil important pour traiter des expériences aléatoires. Elle permet d'expliquer le déroulement de celles-ci et d'aborder des problèmes compliqués par le biais d'une démarche expérimentale (**GUEDRI, 2018**).

IV.3. Estimation de la probabilité de défaillance.

Pour la simulation, nous avons mis en place un outil de calcul, sous Matlab, qui nous permettra d'effectuer tous les calculs nécessaires afin d'aboutir à la probabilité de défaillance de notre massif du sol.

IV.4. Génération de nombres aléatoires.

Nous considérons comme hypothèse de départ que tous les paramètres de notre système mécanique considérés comme variable aléatoire suivent une loi de distribution de Gauss (normale) avec une moyenne et un écart type. Pour les besoins de la simulation, nous utilisons un générateur de variables aléatoire intégré dans le logiciel Matlab à savoir randn (randn normal).

IV.5. Organigramme de calcul.

L'organigramme, ci-dessous, Figure III.13, illustre la procédure de calcul de la probabilité de défaillance par la méthode de Monte Carlo.

Après lecture des données géométrique et mécanique, nous introduisons les propriétés des différents cercles :

- Le programme génère des variables aléatoires selon les lois définis pour chaque paramètre,
- Le programme calcul la contrainte maximale
- Un test de rupture est effectué pour localiser les défaillances
- Enfin le programme estime la probabilité de défaillance

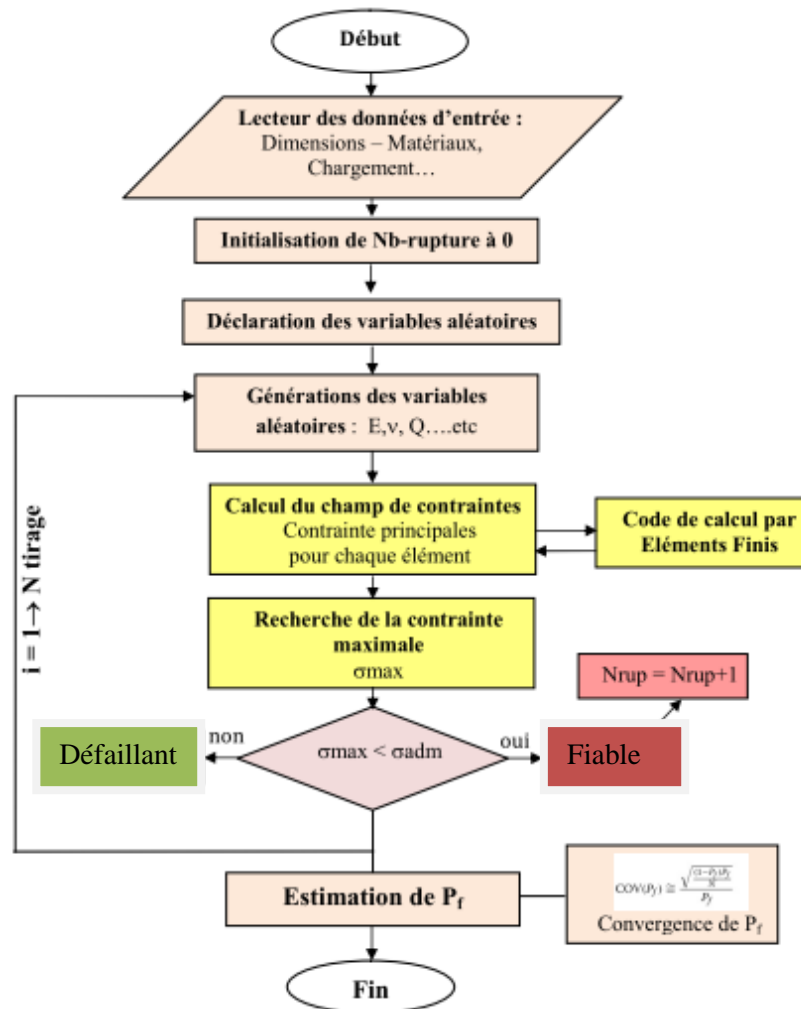


Figure IV.22. Organigramme de calcul de la probabilité de défaillance d'un massif de sol sous une fondation avec la méthode de Monté Carlo

IV.6. Choix des variables aléatoires.

La modélisation, du comportement d'un massif de sol sous une fondation, est affectée par de nombreuses incertitudes, dont il est difficile d'estimer quantitativement les variabilités associées. Les sources d'incertitudes, retenues dans notre étude, sont relatives aux propriétés physiques et mécaniques du sol. Ces paramètres sont pris comme variables aléatoires et sont représentés dans le tableau IV.7, ci-dessous. Reste donc à préciser leur loi de distribution. Etant donné que l'on travaille avec des données issues de la littérature qui portent sur des valeurs moyennes, il semble plus pertinent de recourir à la loi normale qui fournit les proportions de valeurs comprises dans des intervalles centrés sur la moyenne

Tableau IV.7. Variables aléatoires et loi de distribution des paramètres.

Paramètre	Loi de distribution	Moyenne	Cv (%)
Charge q (KN/m ²)	Loi normale	50	10
		60	
		75	
		100	
Contrainte Limite σ_{lim} (KN/m ²)	Loi normale	150	10
Module de Young E (KN/m ²)	Loi normale	10⁵	10
Coefficient de poisson ν	Loi normale	0.3	10

IV.7. Choix de la fonction d'état limite.

La notion de probabilité (mode) de défaillance est étroitement liée à la notion de fonction d'état limite (ou fonction de défaillance) G . Alors, si l'on désire estimer la probabilité de défaillance G de notre massif de sol, nous devons définir l'état limite au-delà duquel le système physique n'est plus considéré comme fiable (stable). Ces états limites correspondent principalement à des exigences en termes de tenue mécanique (la défaillance est associée à la ruine du système étudié) ou d'aptitude au service (la défaillance est associée à des dépassements excessifs de la capacité).

Pour définir cette fonction d'état limite, nous devons considérer le comportement mécanique de notre massif de sol. Autrement dit, nous devons identifier tous les modes de rupture possibles. Ainsi, pour chaque mode de rupture, il faudra définir une fonction d'état limite G .

Avec :

$$G\{X\} = R\{X\} - S\{X\}$$

R : une caractéristique de résistance.

S : une donnée relative à la sollicitation appliquée.

Ainsi, en considérant le comportement mécanique de notre massif du sol nous pouvons définir la fonction suivante :

$$G = \sigma_{\max} - \sigma_{\lim}$$

σ_{\max} : contrainte maximale

σ_{\lim} : contrainte limite

Selon le chapitre II, Si : $G(R, S) > 0$: nous sommes dans le domaine de sécurité.

IV.8. Conclusion

À travers ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes à suivre pour obtenir les valeurs de la probabilité de défaillance. Les résultats obtenus seront présentés dans le chapitre V qui suit.



Chapitre V
Résultat de l'analyse fiabiliste

V.1. Introduction

Le chapitre précédent est consacré à la présentation de la démarche suivie pour effectuer l'analyse fiabiliste de notre massif. Les résultats issus de cette démarche seront présentés dans ce qui suit. Ainsi nous présenterons les principaux résultats issus des différentes simulations effectuées.

V.2. Variabilité des paramètres aléatoires

Lorsque nous effectuons une analyse d'un système mécanique (dans le sens large du terme), il est important de définir les variables qui interviennent à savoir les variables d'entrée, les variables de calcul et enfin les variables de sortie. Lorsqu'en plus nous réalisons une analyse fiabiliste il est important d'identifier les variables aléatoires.

V.2.1. Paramètres d'entrée

Les variables d'entrée considérées comme aléatoires sont représentées dans le tableau V.1.

Tableau V.8. Variable aléatoire et loi de distribution du paramètre.

Paramètre	Loi de distribution	La Moyenne
Charge q (KN/m ²)	Loi normale	q = 50 q=60 q =75 q =100
Contrainte limite du sol σ_{lim} (KN/m ²)	Loi normale	$\sigma_{lim}=150$
Module de Young E (KN/m ²)	Loi normale	$E = 10^5$
Coefficient de poisson ν	Loi normale	$\nu=0.3$

Nous tenons à indiquer que par manque d'informations concernant la variabilité des paramètre (absence d'échantillon de mesure des paramètres), les variables considérées comme aléatoires suivent une loi normale de moyenne comme indiqué dans le tableau V.8 et un

coefficient de variation cv pris égal à 10%. En considérant la variabilité définie dans le tableau V.8, nous représentons la distribution de ces paramètres aléatoires sur les figures V.23, V.24, V.25, V.26,.

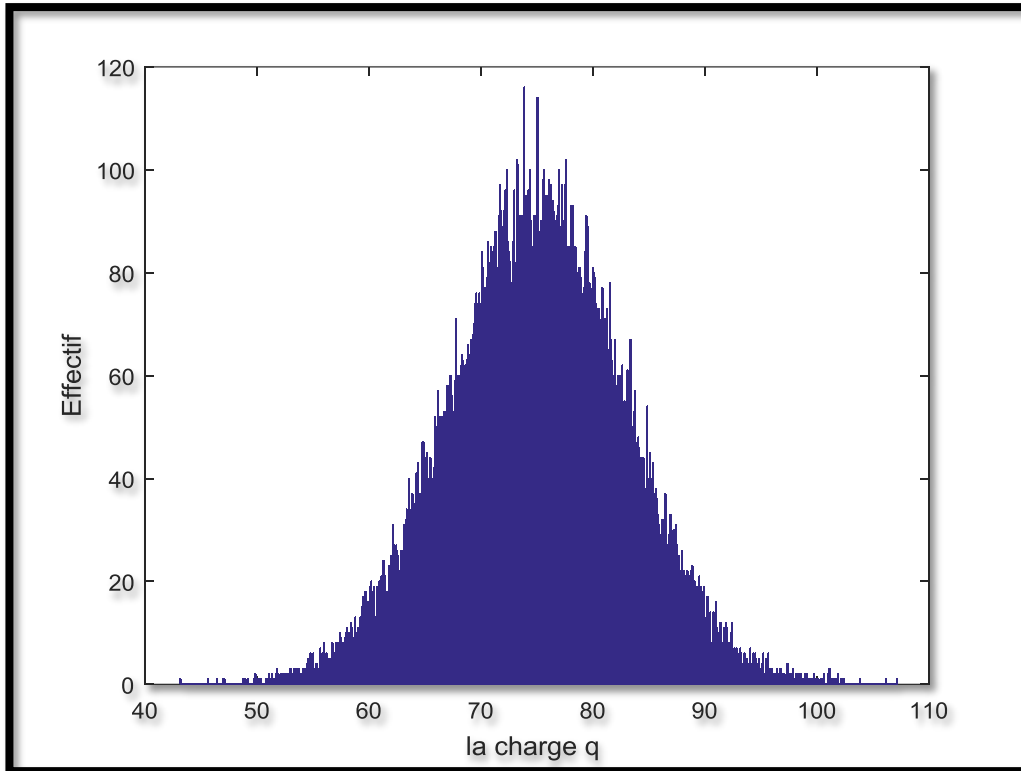


Figure V.23. Histogramme de la distribution de la charge q

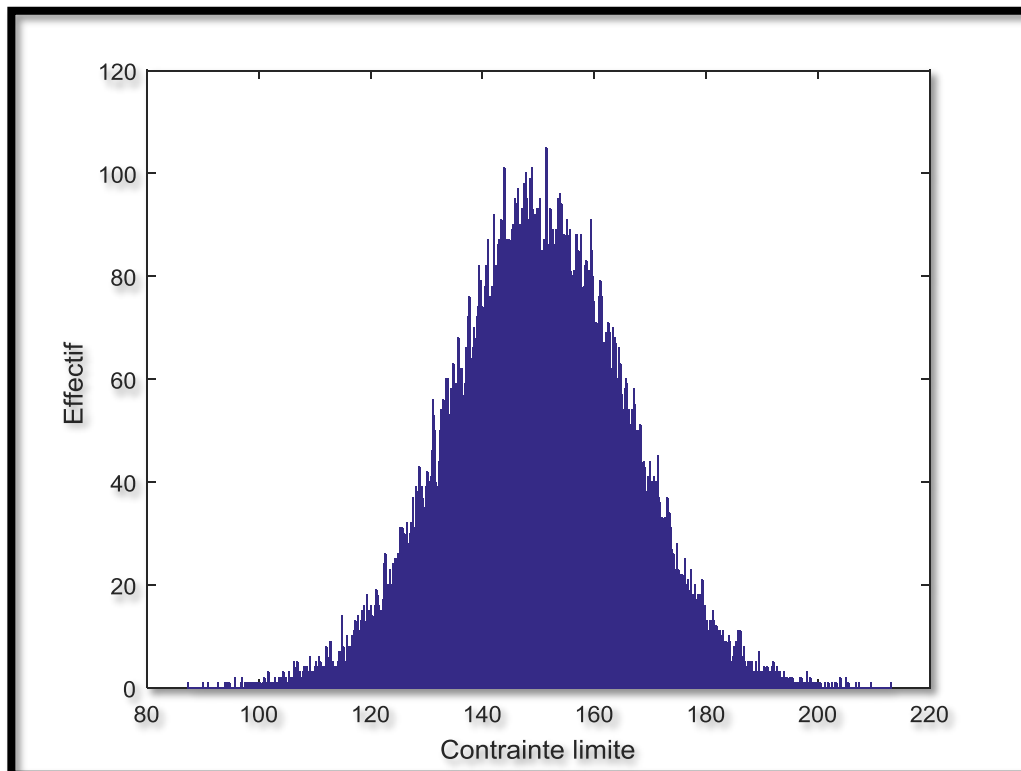


Figure V.24. Histogramme de la distribution de la contrainte limite σ_{lim} .

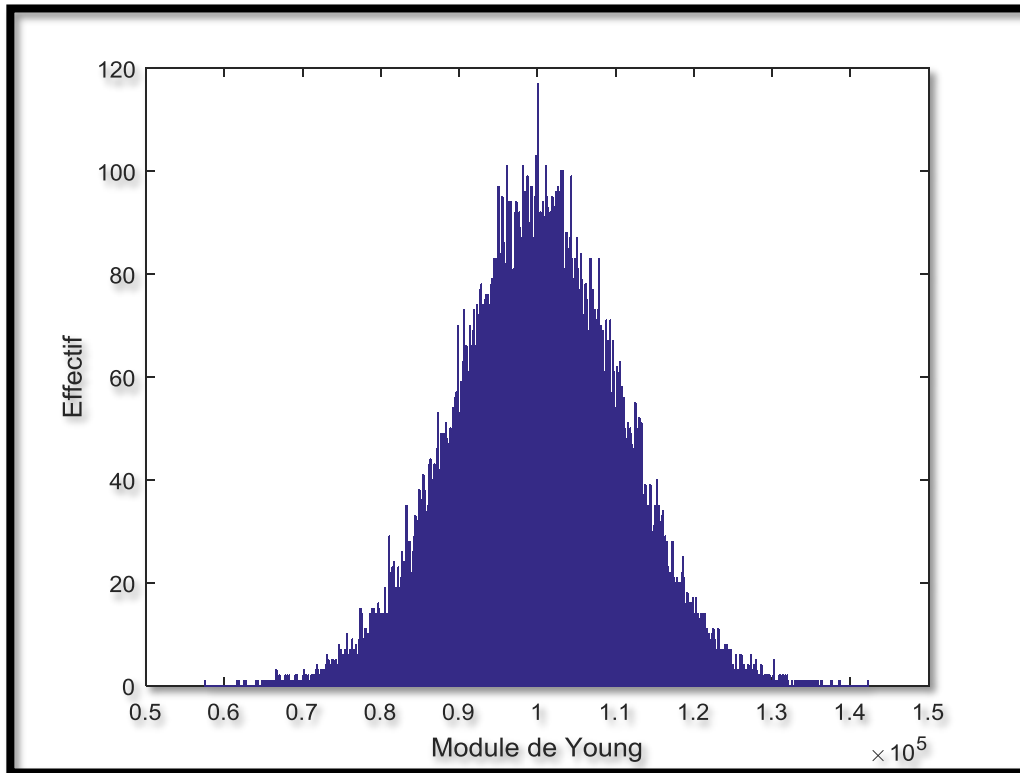


Figure V.25. Histogramme de la distribution de module d'élasticité E (Module de young)

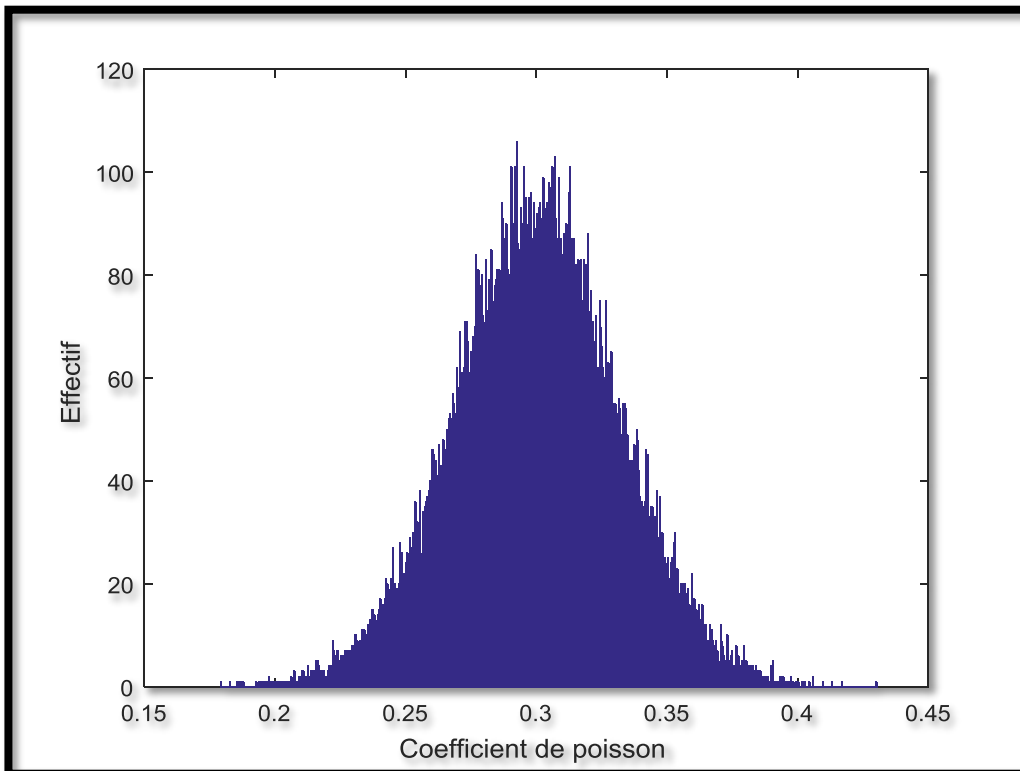


Figure V.26. Histogramme de la distribution de Coefficient de poisson ν

Comme illustré sur les différentes figures, les courbes montrent que l'allure obtenue se rapproche d'une manière remarquable de l'allure d'une distribution normale. Ceci nous permet de vérifier la qualité de notre générateur de variables aléatoire.

V.2.2. Paramètre de sortie

Afin d'illustrer l'effet de la variabilité des paramètres d'entrée présentés ci-dessus sur la réponse de notre système mécanique à savoir dans notre cas le massif de sol sous une fondation, nous présentons sur la figure V.27, la variabilité de notre paramètre de sortie. Rappelons que le paramètre de sortie dans notre cas est la contrainte maximale. Ce choix est indiqué par le critère de rupture qui s'exprime en fonction de ce paramètre.

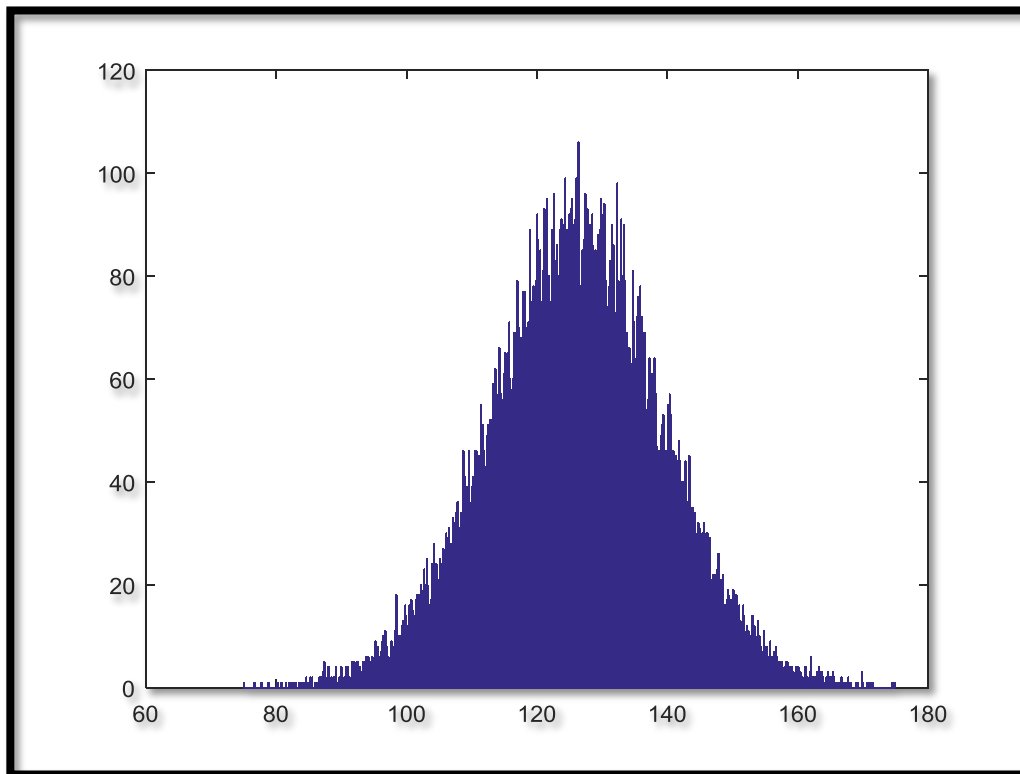


Figure V.27. Histogramme de la distribution de la contrainte maximale σ_{\max}

V.3. Estimation de la probabilité de défaillance du massif de sol

V.3.1. Etude de la probabilité de défaillance de notre massif de sol en considérant la charge comme variable aléatoire

Dans cette partie on propose d'analyser la probabilité de défaillance en considérant une seule variable aléatoire à savoir la charge appliquée q (KN/m²).

IV.3.1.1. Effets du nombre de tirages sur la probabilité de défaillance

L'analyse de l'effet du nombre de tirage permet de déterminer la valeur de référence de la probabilité de défaillance. En effet pour valider les résultats des simulations il faut d'abord vérifier la convergence de la méthode de « Monté Carlo ».

Le tableau V.9, Ci-dessous, montre l'évolution de la probabilité de défaillance en fonction du nombre de tirages effectués.

Tableau V.9. Effets de la variabilité du nombre de tirages sur la probabilité de défaillance

Nombre de tirages	Probabilité de défaillance
10000	0.027
30000	0.028
50000	0.029
100000	0.029

Remarque

Les résultats du tableau V.9, sont déterminés à partir d'une charge égale à **75 KN/m²** et une valeur du coefficient de variation **Cv= 10%**.

Nous constatons qu'à partir d'un nombre de tirages de 50 000 la probabilité de défaillance tend à se stabiliser (on obtient la même valeur). Ainsi pour tous les calculs qui vont suivre nous retenons le nombre de tirage de **50 000**. Ajouter à cela, le résultat obtenu montre que la probabilité de défaillance de notre massif de sol est de l'ordre de **2.9x10⁻²**.

V.3.1.2. Effets de l'écart type sur la probabilité de défaillance

En plus de l'estimation de la probabilité de défaillance, l'analyse fiabiliste permet d'identifier les paramètres dont il faudra contrôler au mieux la valeur. Pour ce faire, on a augmenté la valeur du coefficient de variation (cela revient à faire varier l'écart type) de notre variable aléatoire (q) de 10%, 20 % et 30 % puis on a calculé la probabilité de défaillance correspondant à chaque cas.. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau V.10.

Tableau V.10. Effets de la variabilité de l'écart type sur la probabilité de défaillance d'un massif de sol.

Coefficient de variation Cv (%)	La charge q (KN/m ²)	Probabilité de défaillance P _f
10	50	0
	60	0
	75	0.029
	100	0.866
20	50	2.10 ⁻⁵
	60	0.00694
	75	0.1723
	100	0.70842
30	50	0.00456
	60	0.0519
	75	0.2639
	100	0.63832

À travers les résultats présentés dans le tableau V.10, nous remarquons que l'augmentation de l'écart type conduit assez souvent à l'augmentation de la probabilité de défaillance. Dans le but d'illustrer cette augmentation, nous représentons ces résultats sur la figure V.28. En effet sur cette figure nous présentons, l'évolution de la probabilité de défaillance en fonction de l'écart type.

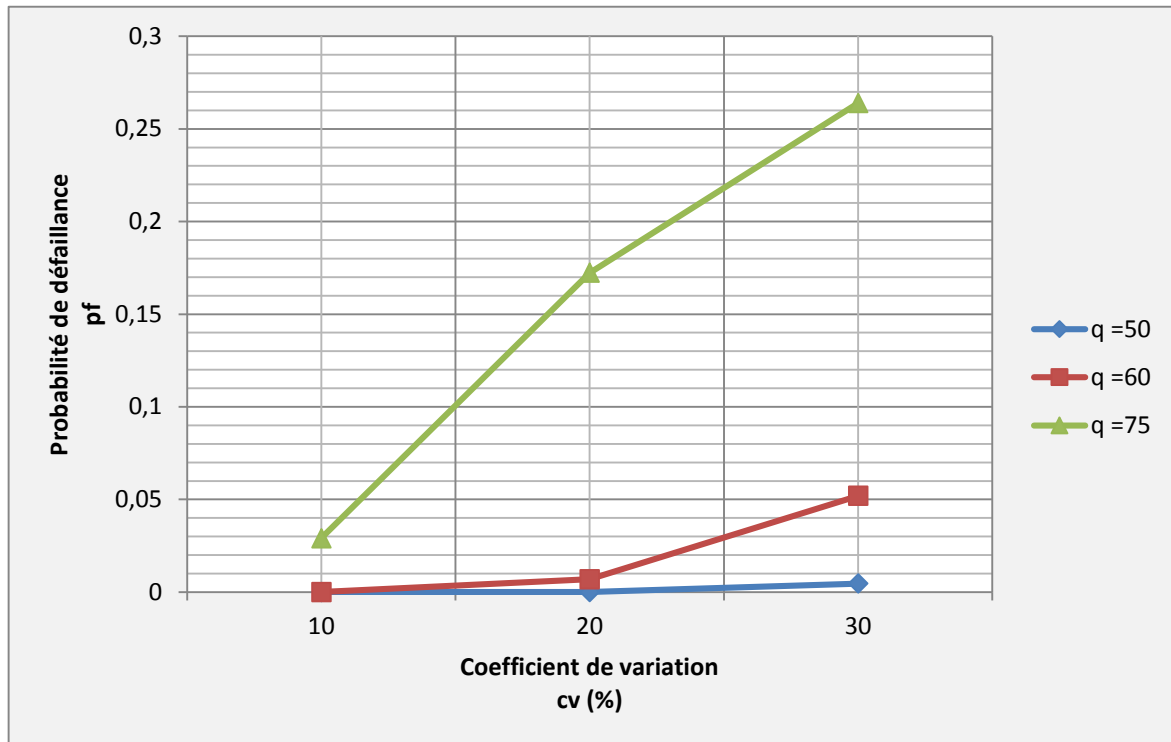


Figure V.28. Courbe probabilité de défaillance - l'écart type

V.3.1.3. Effets de la moyenne du paramètre (q) sur la probabilité de défaillance

Afin de mettre en évidence l'effet de la charge q sur la probabilité de défaillance, nous avons présentés sur le tableau V11, l'évolution de cette probabilité de défaillance en faisant varier la valeur moyenne de la charge q . Il y a lieu de préciser que dans notre cas d'étude, on présente l'évolution de cette probabilité avec une valeur de $Cv= 10\%$.

Tableau V.11. Effets de la valeur moyenne de la charge q sur la probabilité de défaillance.

q (KN/m ²)	50	60	75	100
P _f	0	0	0.029	0.866

Nous constatons que la probabilité de défaillance augmente d'une manière importante avec l'augmentation de la charge q . Ceci semble être évident puisque la charge q représente la principale sollicitation de notre structure.

V.3.2. Etude de la probabilité de défaillance de notre massif de sol avec deux variables aléatoires : charge et contrainte limite du sol

Nous Proposons d'analyser maintenant l'influence de deux variables aléatoires sur la probabilité de défaillance à savoir : La charge appliquée et la contrainte limite du sol.

V.3.2.1 Effets de la variabilité des deux paramètres

Dans le tableau V.12, nous présentons la probabilité de défaillance en faisant varier le coefficient de variation (l'écart type) des deux variables aléatoires. Notons que dans ce cas nous faisons varier le niveau de chargement à savoir la charge q et pour chaque niveau de chargement nous faisons varier le coefficient de variation pour tenir compte de la variabilité du paramètre.

L'analyse des résultats récapitulés dans le tableau montrent clairement que lorsque nous augmentons la variabilité des paramètres aléatoires, les probabilités de défaillance augmentent. Ceci confirme les résultats obtenus dans la littérature.

Sur la figure V.29, nous représentons les résultats obtenus dans le but d'illustrer que l'augmentation de la probabilité de défaillance est en relation avec l'augmentation de l'écart type de chacun des paramètres aléatoires.

Tableau V.12. Evolution de la probabilité de défaillance en fonction de la variabilité des deux paramètres (charge q + contrainte limite σ_{lim}).

L'écart type C_v (%)	Variables aléatoires (q, σ_{lim})	p_f
10	$q = 50$ $\sigma_{lim} = 150$	7.10^{-5}
	$q = 60$ $\sigma_{lim} = 150$	0.00325
	$q = 75$ $\sigma_{lim} = 150$	0.10896
20	$q = 50$ $\sigma_{lim} = 150$	0.00166
	$q = 60$ $\sigma_{lim} = 150$	0.02676
	$q = 75$ $\sigma_{lim} = 150$	0.20794
30	$q = 50$ $\sigma_{lim} = 150$	0.01252
	$q = 60$ $\sigma_{lim} = 150$	0.07282
	$q = 75$ $\sigma_{lim} = 150$	0.27736

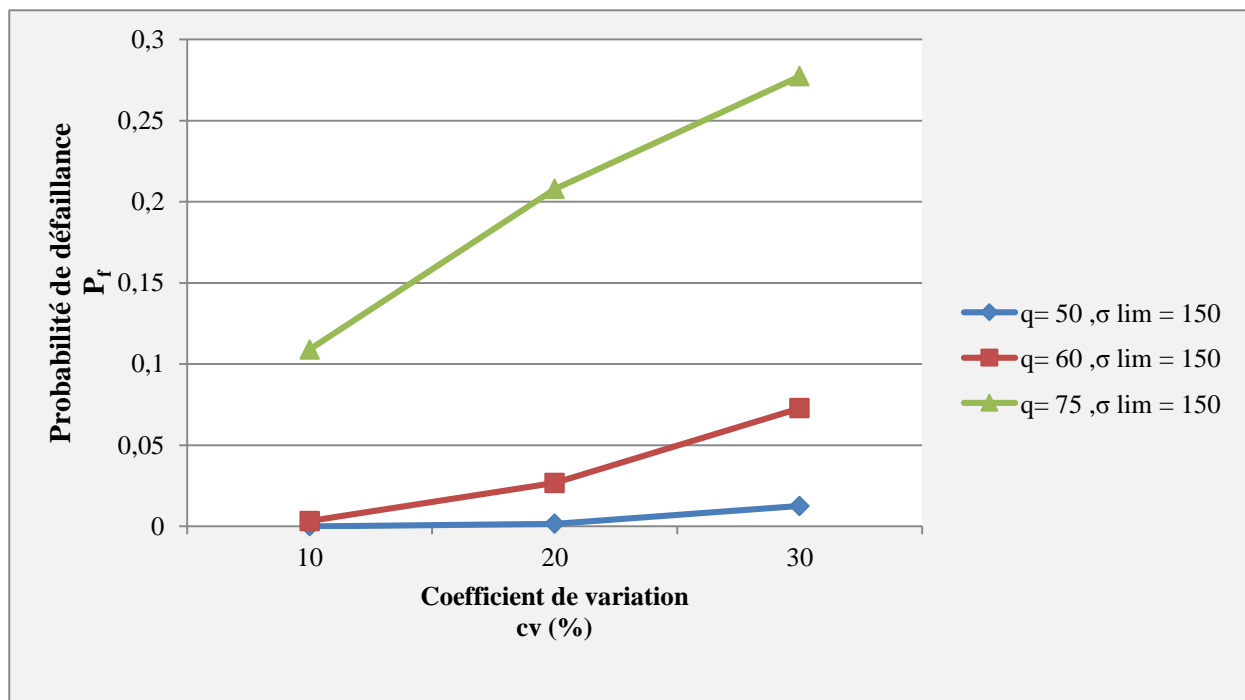


Figure V.29. Evolution de La probabilité de défaillance en fonction du coefficient de variation des deux variables aléatoires (q, σ_{lim}).

V.3.3. Effets de la moyenne des 4 paramètres (q, σ_{lim}, E, ν) sur la probabilité de défaillance

Nous Proposons d'analyser dans ce qui suit, l'influence de quatre (04) variables aléatoires sur la probabilité de défaillance. Les paramètres étudiés sont respectivement la charge appliquée (q), la contrainte limite (σ_{lim}) du sol et le module de Young (E), coefficient de poisson (ν) Les résultats obtenus sont représentées dans le tableau V.13.

Tableau V.13. Evolution de la probabilité de défaillance en fonction des quatre variables aléatoires ($q + \sigma_{lim} + E + v$)

L'écart type Cv (%)	Variables aléatoires (v, E, q, σ_{lim})	p_f
10	$q = 50$ $\sigma_{lim} = 150$ $E = 100000$ $v = 0.3$	8.10^{-5}
	$q = 60$ $\sigma_{lim} = 150$ $E = 100000$ $v = 0.3$	0.00308
	$q = 75$ $\sigma_{lim} = 150$ $E = 100000$ $v = 0.3$	0.11104
	$q = 100$ $\sigma_{lim} = 150$ $E = 100000$ $v = 0.3$	0.7896

Afin d'illustrer les notions de risque et de coefficient de sécurité, nous présentons sur le tableau V.14 les résultats des simulations en considérant maintenant les valeurs caractéristiques des variables statistiques à savoir la valeur correspondant à 5% et la valeur correspondant à 95%. Nous représentons en rouge les cas de défaillance et en vert les cas de non défaillance (sûreté).

A partir du tableau V.14, nous constatons que lorsque nous considérons la valeur caractéristique de 95% pour la contrainte limite nous n'avons pas de cas de défaillance. Nous sommes dans le domaine de la sécurité. Cependant lorsque nous considérons la valeur caractéristique de 5% pour la contrainte limite nous avons plus de chance d'avoir des cas de défaillance.

A partir du tableau V.14, nous constatons que lorsque nous considérons la valeur caractéristique de 5% pour la charge appliquée, nous n'avons pas de cas de défaillance. Nous sommes dans le domaine de la sécurité. Cependant lorsque nous considérons la valeur caractéristique de 95% pour la charge appliquée nous avons plus de chance d'avoir des cas de défaillance.

Ceci illustre bien le principe des coefficients de sécurité appliqués dans les règlements qui ont pour principe la minimisation des résistances et la maximisation des sollicitations

Tableau V.14. Les valeurs de la contrainte maximale

		Q		
		5% (55 KN/m ²)	q _{moy} (75 KN/m ²)	95% (95 KN/m ²)
σ _{lim}	5% (110KN/m ²)	93	126	160
	150 KN/m ²	93	126	160
	95% (190KN/m ²)	93	126	160

V.5. Comparaison entre les solutions présentées avec plusieurs variables aléatoires

Dans le but de jauger plus la fiabilité de notre structure, nous avons présentés dans le tableau V.8 plusieurs cas et nous remarquons que la probabilité de défaillance a augmenté en passant d'une seule variable aléatoire à quatre variables aléatoires.

Autrement dit lorsque nous considérons la charge q comme variable aléatoire on obtient une probabilité de défaillance inférieure à celle calculée en considérant plusieurs variables aléatoires (la charge q, la contrainte limite σ_{lim} , Module de Young E, Coefficient de poisson ν).

Il y a lieu d'indiquer que les résultats de ce tableau sont obtenus en considérant un coefficient de variation de 10%.

Notons aussi que les résultats montrent clairement que les paramètres les plus influents sont la charge appliquée et la contrainte limite du sol.

En effet, nous constatons que lorsque nous introduisons le module de Young et le coefficient élastique la variation de la probabilité de défaillance est légère comparé à la variation induite par l'introduction comme variable aléatoire de la charge appliquée et la contrainte limite du sol.

Tableau V.15. Comparaison entre les solutions présentées avec plusieurs variables aléatoires

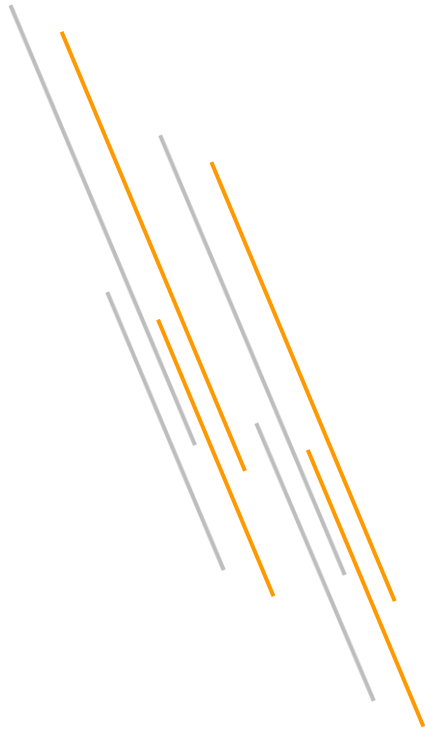
Variables aléatoires	$q = 75$	$q = 75 \text{ KN/m}^2$ $\sigma_{lim} = 150 \text{ KN/m}^2$	$q = 75 \text{ KN/m}^2$ $\sigma_{lim} = 150 \text{ KN/m}^2$ $E = 100000$ $\nu = 0.3$
Probabilité de défaillance P_f	0.029	0.10896	0.11104

V.6. Conclusion

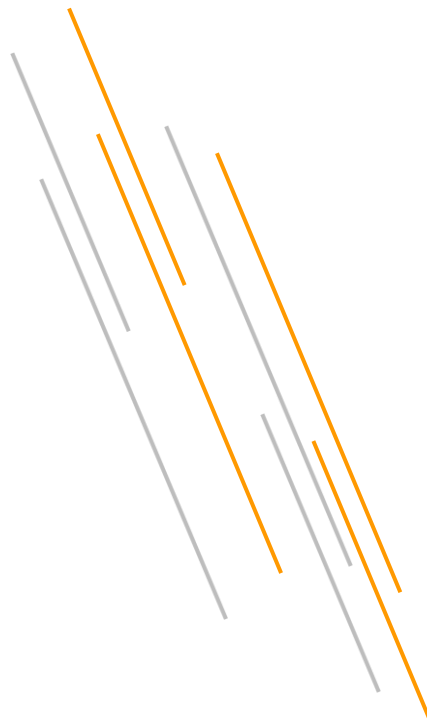
L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats issus de l'analyse fiabiliste de notre massif du sol sous une fondation.

Les résultats ont montré

- Qu'à partir de la charge $q = 75 \text{ KN/m}^2$, la probabilité de défaillance est supérieure à la valeur limite admise pour les structures de génie civil ($P_f > 10^{-3}$). Sachant que dans le calcul déterministe cette condition est vérifiée.
- La démarche fiabiliste nous a permis d'estimer le risque pris par le concepteur puisque nous avons estimé la probabilité de défaillance autrement dit nous avons donné une valeur à la possibilité de rupture de notre structure étudiée alors que dans le calcul déterministe nous pouvons juste dire si le critère de rupture est vérifié ou pas.
- Compte tenu du fait que la probabilité de défaillance obtenue n'est pas admise en comparaison avec les probabilités de défaillance admises pour les structures de Génie civil, il serait intéressant d'optimiser notre structure en se fixant comme cette valeur de P_f comme valeur cible à savoir $P_f = 10^{-3}$.
- Dans ce cas, nous allons déterminer la capacité portante de notre sol de fondation correspondant à cette valeur de la probabilité de défaillance autrement une valeur du risque fixé par le maître de l'ouvrage. C'est ce que l'on appelle la probabilité de défaillance cible.



CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

Les résultats présentés dans ce mémoire mettent en lumière l'intérêt des différentes méthodes utilisées dans ce travail à savoir ; méthodes probabilistes et méthodes déterministe (méthodes des éléments finis), dans l'étude des systèmes géotechniques, en particulier un massif de sol sous une fondation.

La méthode déterministe a permis de calculer le point de performance correspondant aux contraintes maximales de la structure. Nous avons constaté que la structure convenait bien Pour une valeur déterminée.

L'introduction de la démarche fiabiliste (probabiliste) nous a permis d'estimer le risque pris par le concepteur puisque nous avons estimé la probabilité de défaillance autrement dit nous avons donné une valeur à la possibilité de rupture de notre structure étudiée.

Sur un autre plan, cette étude a permis de découvrir et mettre en œuvre :

- La modélisation numérique à travers la méthode des éléments finis qui permet de simuler des problèmes mécaniques et la modélisation probabiliste qui permet de prendre en charge un grand nombre de variables aléatoires qui n'aurait pu facilement se faire dans un calcul traditionnel,
- La découverte du script Matlab qui transforme la complexité de la tâche à réaliser en un travail attrayant.

Enfin, nous demandons aux ingénieurs d'accorder une grande importance à l'approche probabiliste du calcul de la capacité portante des fondations superficielles, car ces calculs seront d'une importance évidente en raison des résultats plus précis donnés par l'approche probabiliste.

Références bibliographiques

AKLI D et RIHANE M. (2017). Analyse fiabiliste du comportement non linéaire d'un réservoir surélevé sur pilotis. Mémoire de master en Génie Civil. Option : Constructions Hydrauliques & Aménagements. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou

AMIRAT M et BELOUFA M.(2021). COURS ET APPLICATIONS DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS.Universitaire d' Ain Témouchent de Ain Témouchent

Ameddah S. (2015). Approche fiabiliste appliquée à la stabilité des talus. Mémoire de master recherche Spécialité: Génie Civil, Option : Géotechnique et environnement. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.

BOUKHARI F. (2014). INFLUENCE DU MAILLAGE DANS LA SIMULATION DES OSSATURES EN BETON ARME. Mémoire de master en Génie Civil. Option :Structures et matériaux Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.

Dehmous H. (2007). *Fiabilité et micromécanique des matériaux composites Application à la passerelle de Loraine.* Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse Ecole Doctorale Matériaux - Structure – Mécanique.

Dhatt G. and Touzot G. *Une Présentation de la Méthode des Éléments Finis*, Deuxième édition. MaloineS.A. Editeurs, Paris, France, 1984.

Ditlevsen O.D. et Madsen H.O. (1996).Structural ReliabilityMethods. John Wiley& Sons Inc.

Hammer P.C., Marlowe O.J., and Stroud A.H. Mathematical tables and other aids to computation, *American Mathematical Society*, 10(55), 130–136, 1956.

GUEDRI T. (2018). Approche Fiabiliste de la Stabilité du Barrage de Souk-Tlata. Mémoire de master en Génie Civil. Option : Géotechnique. Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou.

Khennane A. (2013). Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. CRC Press.france

Lévi R. (1949).Calculs probabilistes de la sécurité des constructions, Annales des Ponts et Chaussées 26.

Lemaire M. (2009).Structural Reliability. ISTE/Wiley.

Lyonnet P. (2006).*Ingénierie de la fiabilité*. Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris

MADOUN I et SOUIAH M. (2021).ETUDE NUMERIQUE DE LA CAPACITE PORTANTE D'UNE SEMELLE SUPERFICIELLE. . Mémoire de master en Génie Civil. Option : Géotechnique. UNIVERSITÉ DESAÏDA - Dr MOULAY TAHAR de Saida .

Madsen H.O. Krenk S and Lind N.C. (1986).*Methods of structural safety, Dover Publications.*

Maynadier J.(2003). *Approches statistiques et fiabilistes en dynamique des structures.* Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

Schneider J.(1997).*Introduction to Safety and Reliability of Structures,* Structural Engineering Documents 5.

Smith I.M. and Griffiths D.V. *Programming the Finite Element Method,* 2nd edn. Wiley, Chichester, U.K.,1988.

Tebbi, O. (2005). Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés. Thèse de doctorat, A l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers.

Timoshenko S. and Goodier J. *Theory of Elasticity,* 3rd edn. McGraw-Hill, New York, 1970.

Timoshenko S. and Woinowsky-Krieger S. *Theory of Plates and Shells.* McGraw-Hill, New York, 1959.

Zienkiewicz O.C. *The Finite Element Method,* 3rd edn. McGraw-Hill, York, London, 1977.